



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Análisis de la resuspensión de sedimentos en la bahía dels Alfacs (Delta del Ebro)

Treball realitzat per:

Laura Solà Ramis

Dirigit per:

Manuel Espino Infantes

Manel Grifoll Colls

Pablo Cerralbo Peñarroya

Màster en:

Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Barcelona, 20 de juny de 2016

Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

Agradecimientos

Aquest treball no està acabat fins que no us agraeixi, a cadascú de vosaltres, la vostra ajuda i suport durant aquest any o durant el llarg camí que ha suposat l'eterna carrera.

Per començar, gràcies al Manuel Espino, al Manel Grifoll i al Pablo Cerrralbo, els tutors del treball. Al principi el Manuel em va proposar el tema, que ha donat mil voltes fins que ha arribat a ser això. Durant tot el procés s'ha mostrat més que predisposat, en tot moment, d'ajudar-me i recolzar-me. La veritat és que ha estat un encert haver pensat en ell a l'hora de fer aquest treball. Des de la idea inicial, fins a les correccions finals (que marcaven tot el document en vermell), passant per les reunions gairebé mensuals (que m'han servit per no deixar-ho tot pel final encara que al principi va suposar un gran esforç en solapar-se la feina i les classes). Sempre s'ha mostrat predisposat a donar un cop de mà i aclarir-me les idees. El mateix pel Pablo i el Manel, sempre atents als correus i molt dedicats a l'hora de facilitar-me documentació i noves idees. Moltes gràcies a tots tres, dóna gust treballar en un tema que es nota que us fascina i també que us agrada ensenyar.

Dins el món de la universitat, també he d'agrair als meus companys, o més ben dits, amics, que sempre m'emportaré. Tots junts hem passat èpoques complicades, amb caps de setmana dedicats única i exclusivament als estudis, però sempre amb un somriure perquè si cau un, els altres l'aixequem! Ja ho sabeu, tenim molta sort i hem de ser feliços! Laura, Eli, Luis i David, gràcies! Alguns ja acabem i d'altres ho farem d'aquí poc, però hem lluitat junts tots aquests anys i per això us he d'agrair el vostre suport (sobretot durant el màster... Sense vosaltres segur que no hagués aprovat, ja sabeu què vull dir...)

Paula i Clara, no penseu que m'oblido de vosaltres. La majoria d'apunts eren originalment vostres... Però això no és el més important, sinó els viatges d'estiu i mil i una experiències d'allò més diverses que encara han de continuar creixent. Sopars que fins i tot fan plorar d'emoció, ajuden a desconnectar de moments d'allò més intensos.

També vull donar les gràcies a les Martes, a la Mariona i a la Olga perquè han tingut molta paciència. M'hagués agradat estar amb vosaltres en moltes ocasions que no ha pogut ser pel temps que em treia la universitat. Heu acceptat tranquil·lament que hi havia moments en que no podia ser i a més a més quan aconseguia veure-us rèiem tant que m'oblidava de tots els moments complicats. Potser no us en adoneu però aquest objectiu assolit és gràcies a vosaltres!

Per acabar, gràcies al Pare i a la Mare. Heu confiat sempre amb mi, m'heu ajudat portant-me aquells crustonets de pa a mig matí de diumenge. I sobretot, sempre heu insistit en que podia aconseguir-ho, sense la vostra confiança no m'hagués vist capaç. Tete, a tu també gràcies, per les estones al Camp Nou que em permetien desfogar-me, m'animaves i em donaves força.

Sergio, amb tu seré breu però segurament més intensa: gràcies.

Resumen

En la bahía dels Alfacs, al sur del Delta del Ebro, se lleva a cabo una gran actividad marisquera. Ésta se ve afectada frecuentemente por episodios de HABs o algas tóxicas que hacen parar esta producción. Estos episodios parece que se desencadenan por la resuspensión de elementos contaminantes del fondo de la bahía que acaban afectando a la producción de moluscos filtradores. Las condiciones dinámicas de la bahía bajo las que se produce esta resuspensión intentan determinar en esta tesina.

Para llevar a cabo el estudio se utilizan datos de dos campañas de medida: la primera realizada entre el 4 de Julio de 2013 y el 17 de Setiembre del mismo año, y la segunda campaña del 25 de Febrero de 2014 al 7 de mayo. De esta forma se pretende poder comparar los resultados de la época de verano con la de invierno. Estas campañas se realizaron dentro del proyecto MESTRAL, y consisten en dos sistemas de fondeo que constan, cada uno de ellos, de un sensor OBS (que mide la turbidez) y un ADCP (que mide la intensidad de corriente a distintas profundidades). Uno de los sistemas de fondeo se instala en el centro de la bahía y el otro en la bocana.

Además, también se dispone de una estación meteorológica en Alcanar. Los datos que ésta proporciona son la dirección e intensidad del viento, a partir de los cuales se calcula empíricamente el oleaje de la bahía.

A partir de todos los datos anteriores y de las propiedades granulométricas de la bahía conocidas gracias a investigaciones anteriores, se consigue calcular la tensión crítica en el fondo debida a las corrientes y la debida al oleaje producido por el viento.

A continuación, se identifican distintos episodios en los que la turbidez sufre un crecimiento repentino, y se correlaciona con algunos de los resultados anteriores. De esta forma, se identifican los agentes que pueden generar la resuspensión de sedimentos. Los mecanismos que parecen ser responsables de este fenómeno son, principalmente, las seiches con frecuencia de una hora y el oleaje generado por el viento de levante. Otras hipótesis posibles en este caso para el patrón cíclico de la turbidez son de carácter biológico o el paso de embarcaciones. Al mismo tiempo, se identifican otros factores que no parecen ser capaces de provocar la resuspensión de partículas del fondo: las brisas de verano, las seiches con frecuencia de tres horas y el viento de mestral.

Abstract

At Alfacs Bay, located south Ebre Delta, it is carried out a large shellfish activity. This is frequently affected by episodes of HABs or Harmful Algal Blooms that make this production stop. These episodes seem to be triggered by the resuspension of contaminants from the bottom of the bay that end up affecting the production of filter-feeding molluscs. This thesis wants to determine the bay dynamic conditions under which this resuspension occurs.

To carry out the study, data from two different field campaigns are used: the first one has been performed between 4th July 2013 and 17th September 2013; the second, from 25th February 2014 to 7th May 2014. In this way, it is intended to compare summer and winter results. These field campaigns were performed within the MESTRAL project, which consists of two mooring systems that include an OBS sensor (which measures the turbidity) and an ADCP (which measures the current intensity in two directions at different depths). One of the mooring systems is situated in the centre of the bay and the other one in the bay mouth.

In addition, a weather station in Alcanar is available. The data that it provides are the direction and intensity of the wind, from which the waves in the bay are empirically calculated.

From all the above data and the granulometric properties of the bay known through previous researches, it is possible to calculate the critical stress at the bottom due to currents and waves produced by the wind.

Then, different episodes are identified in which the turbidity suddenly increases, and it is correlated with the results above. Thus, the agents that can generate the sediment resuspension can be detected. The mechanisms that seem to be responsible for this phenomenon are mainly the seiches of one hour frequency and the waves generated by the wind from the east (llevantades). Other possible hypothesis for the cyclical daily pattern of the turbidity are biological or passing vessels. At the same time, other factors are identified that do not seem to be able to cause the resuspension of the particles from the bottom: the summer breezes, the seiches of three hours frequency and the wind from the NW (mestral)

Lista de figuras

Figura 1: Detalle del Delta del Ebro. (www.maps.google.com).....	2
Figura 2: Análisis del tipo de sedimento que se encuentra en el fondo de la bahía. (Palacín et al., 1991)..	5
Figura 3: Temperatura (líneas) y salinidad (colores) en un perfil de la bahía, durante Julio 2013(a), Febrero 2014 (c) y Mayo 2014(e). Distribución de la densidad (línea continua negra) en un perfil vertical durante las respectivas épocas. (Cerralbo et al., 2015)	7
Figura 4: Localización de las campañas estacionales. A1 y A2 son las localizaciones de la instrumentación de la bocana y del centro de la bahía respectivamente. (Cerralbo, 2015)	11
Figura 5: Sistema de fondeo empleado en la estación de la bahía (arriba) y en la bocana (abajo). Fuente: Joan Puigdefàbregas, Jordi Catura y Quim Sospedra (Laboratori d'Enginyeria Marítima)	13
Figura 6: Perfiladores Aquadopp en sus diferentes configuraciones del cabezal. [www.nortek-es.com]	14
Figura 7: Imágenes de la estación de Alcanar.	17
Figura 8: Promedio vertical de la velocidad para la campaña de invierno, en el centro de la bahía.	19
Figura 9: Turbidez registrada por el OBS de la bocana durante la campaña de invierno.	20
Figura 10: Cálculo de la dirección de las corrientes	22
Figura 11: Rosa de los vientos	24
Figura 12: Diagrama de formación de la brisa marina. La figura A es la brisa marina diurna, mientras que la figura B explica la brisa marina nocturna. [www.wikipedia.com]	25
Figura 13: Velocidad y dirección media del viento.....	26
Figura 14: Rosas de los vientos para la velocidad media.	27
Figura 15: Velocidad y dirección media del viento.....	28
Figura 16: Rosas de los vientos para la velocidad media.	28
Figura 17: Fetch según la dirección del viento para la estación de la bahía (arriba) y la de la bocana (abajo).....	30
Figura 18: Altura de ola para la estación de la bahía durante la campaña de verano.	31
Figura 19: Periodo pico para la estación de la bahía durante la campaña de verano.....	32
Figura 20: Longitud de onda para la estación de la bahía durante la campaña de verano.....	32
Figura 21: Rosa de oleaje para Hs (arriba) y Tp (abajo) en la estación de la bahía durante la campaña de verano.....	33
Figura 22: Altura de ola para la estación de la bahía durante la campaña de invierno.	34
Figura 23: Periodo pico para la estación de la bahía durante la campaña de invierno.....	34
Figura 24: Longitud de onda para la estación de la bahía durante la campaña de invierno.....	34
Figura 25: Rosa de oleaje para Hs (arriba) y Tp (abajo) en la estación de la bahía durante la campaña de invierno.....	35
Figura 26: Altura de ola para la estación de la bocana durante la campaña de verano.....	36
Figura 27: Periodo pico para la estación de la bocana durante la campaña de verano.....	36
Figura 28: Longitud de onda para la estación de la bocana durante la campaña de verano.....	36
Figura 29: Rosa de oleaje para Hs (arriba) y Tp (abajo) en la estación de la bocana durante la campaña de verano.....	37
Figura 30: Altura de ola para la estación de la bocana durante la campaña de invierno.....	38
Figura 31: Periodo pico para la estación de la bocana durante la campaña de invierno.....	38
Figura 32: Longitud de onda para la estación de la bocana durante la campaña de invierno.....	38
Figura 33: Rosa de oleaje para Hs (arriba) y Tp (abajo) en la estación de la bocana durante la campaña de invierno.....	39
Figura 34: Velocidad y dirección de corriente promediado verticalmente, en la estación de la bahía durante la campaña de verano.....	41
Figura 35: Rosa de corrientes promediadas en la vertical, en la estación de la bahía durante la campaña de verano.....	42
Figura 36: Velocidad y dirección de corriente promediado verticalmente en la estación de la bahía durante la campaña de invierno.....	43

Figura 37: Rosa de corrientes promediadas en la vertical, en la estación de la bahía durante la campaña de invierno.	43
Figura 38: Velocidad y dirección de corriente promediado verticalmente en la estación de la bocana durante la campaña de verano.	44
Figura 39: Rosa de corrientes promediadas en la vertical, en la estación de la bocana durante la campaña de verano.	45
Figura 40: Velocidad y dirección de corriente promediado verticalmente, en la estación de la bocana durante la campaña de invierno.	46
Figura 41: Rosa de corrientes promediado en la vertical, en la estación de la bocana durante la campaña de invierno.	46
Figura 42: Turbidez (NTU) registrada por el sensor de la bahía durante la campaña de verano.	47
Figura 43: Turbidez (NTU) registrada en el instrumento de la bahía durante la campaña de invierno.	48
Figura 44: Turbidez (NTU) registrada en el instrumento de la bocana durante la campaña de verano.	48
Figura 45: Turbidez (NTU) registrada en el instrumento de la bocana durante la campaña de invierno.	49
Figura 46: Comparación de la turbidez para ambas campañas y ambas estaciones.	50
Figura 47: Concentración de sedimentos en suspensión en la estación de la bahía durante la campaña de verano.	51
Figura 48: Concentración de sedimentos en suspensión en la estación de la bahía durante la campaña de invierno.	51
Figura 49: Concentración de sedimentos en suspensión en la estación de la bocana durante la campaña de verano.	52
Figura 50: Concentración de sedimentos en suspensión en la estación de la bocana durante la campaña de invierno.	52
Figura 51: Flujo de sedimento en suspensión en la estación de la bahía durante la campaña de verano.	53
Figura 52: Flujo de sedimento en suspensión en la estación de la bahía durante la campaña de invierno.	53
Figura 53: Figura 54: Flujo de sedimento en suspensión en la estación de la bocana durante la campaña de verano.	53
Figura 55: Flujo de sedimento en suspensión en la estación de la bocana durante la campaña de invierno.	54
Figura 56: Tensión de corte sobre el fondo asociada a la corriente en la bahía durante el verano.	55
Figura 57: Tensión de corte sobre el fondo asociada a la corriente en la bahía durante el invierno.	56
Figura 58: Tensión de corte sobre el fondo asociada a la corriente en la bocana durante el verano.	56
Figura 59: Tensión de corte sobre el fondo asociada a la corriente en la bocana durante el invierno.	56
Figura 60: Tensión de corte sobre el fondo asociada al oleaje en la bahía durante el verano.	58
Figura 61: Tensión de corte sobre el fondo asociada al oleaje en la bahía durante el invierno.	58
Figura 62: Tensión de corte sobre el fondo asociada al oleaje en la bocana durante el verano,	58
Figura 63: Tensión de corte sobre el fondo asociada al oleaje en la bocana durante el invierno.	59
Figura 64: Tensión de corte máxima sobre el fondo en la bahía durante el verano.	60
Figura 65: Tensión de corte máxima sobre el fondo en la bahía durante el invierno.	60
Figura 66: Tensión de corte máxima sobre el fondo en la bocana durante el verano.	60
Figura 67: Tensión de corte máxima sobre el fondo en la bocana durante el invierno.	61
Figura 68: Umbral de movimiento de las partículas bajo los efectos de oleaje y corrientes. Fuente: Dynamics of marine sands. (Soulsby 1997)	62
Figura 69: Localización temporal de los escenarios estudiados que tienen lugar durante la campaña de verano de 2013 en la bahía (E1,E2 y E3) y en la bocana (E4).	65
Figura 70: Localización temporal de los escenarios estudiados que tienen lugar durante la campaña de invierno de 2014 en la bahía (E5 y E6) y en la bocana (E7).	65
Figura 71: Series de datos más representativas para el episodio E1.	67
Figura 72: Series de datos más representativas para el episodio E2.	69
Figura 73: Series de datos más representativas para el episodio E3.	71
Figura 74: Series de datos más representativas para el episodio E4.	73
Figura 75: Series de datos más representativas para el episodio E5.	75

Figura 76: Evolución de la turbidez según la hora del día, durante la campaña de verano y la de invierno.	76
Figura 77: Series de datos más representativas para el episodio E6.	78

Lista de tablas

Tabla 1: Características e instrumentación de la estación A1 durante la campaña de verano.	11
Tabla 2: Características e instrumentación de la estación A2 durante la campaña de verano.	11
Tabla 3: Características e instrumentación de la estación A1 durante la campaña de invierno.	12
Tabla 4: Características e instrumentación de la estación A2 durante la campaña de invierno.	12
Tabla 5: Características e instrumentación de la estación meteorológica de Alcanar.	12
Tabla 6: Resumen de valores de oleaje: altura (m) y periodo (s).	40
Tabla 7: Valor de la longitud de rugosidad total en el fondo según el material (Soulsby 1983)	55
Tabla 8: Tabla resumen de los episodios considerados y sus características principales.	79

Tabla de contenidos

Agradecimientos.....	I
Resumen.....	II
Abstract	III
Lista de figuras.....	IV
Lista de tablas	VII
Tabla de contenidos	VIII
1. Introducción.....	1
2. Estado del arte	2
3. Objetivos.....	9
4. Material y métodos	10
4.1. Campaña proyecto MESTRAL.....	10
4.1.1. Introducción	10
4.1.2. Localización	10
4.1.3. Características de las estaciones	11
4.1.4. Características de los instrumentos	14
4.2. Procesado y control de calidad de los datos.....	19
4.2.1. Introducción	19
4.2.2. Generalidades	19
4.2.3. Meteorología.....	21
4.2.4. Corrientes.....	21
4.2.5. Turbidez.....	23
5. Resultados	24
5.1. Análisis de las series temporales	24
5.1.1. Introducción	24
5.1.2. Meteorología.....	24
5.1.3. Oleaje	29
5.1.4. Corrientes.....	40
5.1.5. Turbidez.....	47
5.1.6. Tensiones sobre el fondo	54
5.2. Episodios de turbidez.....	63
5.2.1. Introducción	63
5.2.2. Caracterización de los escenarios	66
5.2.3. Discusión de resultados.....	79
6. Conclusiones	81
7. Referencias bibliográficas	84
7.1. Bibliografía	84
7.2. Webliografía.....	86

1. Introducción

El Delta del Ebro, situado en la provincia de Tarragona, en Catalunya, es un sistema dinámico que se encuentra en constante transformación. Estos cambios vienen inducidos por varios agentes que caracterizan la zona, como el oleaje, el transporte de sedimentos, el viento, las corrientes...La complejidad de este medio despierta un gran interés científico.

La bahía dels Alfacs es una de las dos lagunas costeras que se encuentra en el Delta del Ebro. Se trata de un suelo pantanoso, situado entre el municipio de Sant Carles de la Ràpita y la desembocadura del río Ebro. Está cubierta, en gran parte, por juncales, estanques o albuferas, dado que antiguamente era tan solo un banco de arenas, acrecido por aluviones aportados por uno de los brazos del Ebro que desembocaba en esta zona. Actualmente se ha formado un puerto natural gracias a una nueva lengua de arena, la Banya, que está unido al istmo denominado el Trabucador.

La particularidad del emplazamiento de la bahía dels Alfacs hace que su comportamiento se caracterice por las micro-mareas, una batimetría poco profunda y relativamente constante y bajas aportaciones de agua dulce. Existen varias investigaciones previas en la bahía dels Alfacs. A pesar de esta relativamente extensa bibliografía, algunos aspectos siguen sin ser claros.

La resuspensión de sedimentos en el fondo de la bahía parece ser uno de los desencadenantes de la proliferación de algas nocivas, denominadas HABs. Estas algas contienen toxinas en exceso, que en consecuencia son acumuladas en los moluscos filtradores. Son evidentes, entonces, las pérdidas económicas para la acuicultura que causan este fenómeno. Las condiciones dinámicas que producen esta resuspensión son el objeto de esta tesina.

2. Estado del arte

EL DELTA DEL EBRO

El Delta del Ebro ocupa una superficie de 320Km², toda ella formando un parque natural en la desembocadura del río Ebro, que se sitúa en la provincia de Tarragona. Engloba siete municipios distintos: Amposta, Sant Carles de la Ràpita, Deltebre, l'Aldea, Camarles, Sant Jaume d'Enveja y l'Ampolla. Con estos datos, se convierte en la zona húmeda más extensa del Oeste del Mediterráneo, después de la Camarga francesa.

La morfología deltaica varía constantemente. Esto es debido a que se trata de un ejemplo de delta que es creado por la influencia de los ríos y al mismo tiempo por los procesos costeros. Los aportes de sedimento del río Ebro y las corrientes marinas y temporales de levante son los que le dan forma. Un ejemplo de esta constante variación es la conocida isla de Buda. Su aparición data de hace tan solo 200 años. Se puede afirmar que se trata de una zona de fuerte crecimiento activo durante estos siglos. (Pallarès, 2010)

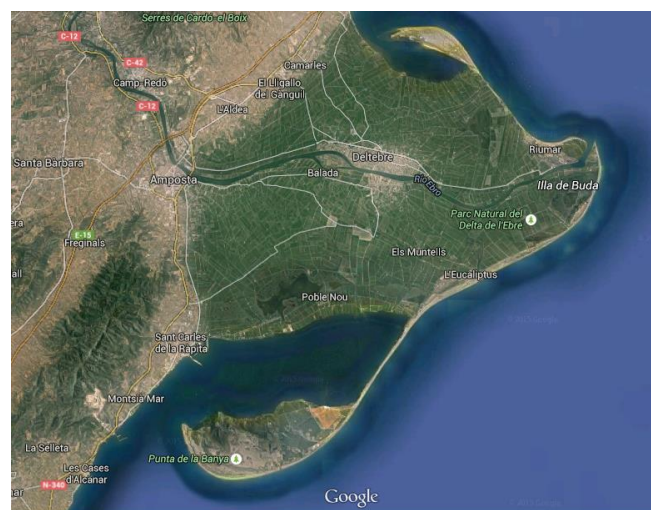


Figura 1: Detalle del Delta del Ebro. (www.maps.google.com)

La explotación que lleva a cabo el hombre sobre este territorio, más adelante comentada, se ha opuesto muchas veces y de forma reiterada a los valores naturales que representa. El papel biológico que desenvuelve se ve frecuentemente chocado por la profunda humanización que sufre toda su superficie, claramente identificada con la actividad agrícola que se desarrolla en ella. (Pallarès, 2010)

Con la finalidad de armonizar esta oposición y a raíz de unas desecaciones en el conjunto lacustre del lugar, los habitantes del municipio de Deltebre instaron, a través de una movilización y ocupación pacífica en el Canal Vell, el 26 de Junio de 1983, a la Generalitat de Catalunya para crear el Parque Natural del Delta del Ebro. Esto se hizo a partir de un decreto redactado y publicado el 4 de agosto de ese mismo año, aunque en primera instancia solo protegía los espacios naturales del margen izquierdo del río. Dos años más tarde, el Decreto 332/1986 hacía extensiva la protección a las zonas naturales del

margen derecho del río. De esta forma se logra hacer constar que el Delta del Ebro es la primera zona húmeda de Catalunya, y que su reconocimiento se hace llegar hasta los máximos organismos internacionales especializados. (Generalitat de Catalunya, 2009)

El Parque Natural del Delta del Ebro tiene una superficie total de 7.736 ha, que se divide en dos comarcas. Por una parte, el hemidelta derecho (3.979 ha) corresponde a la comarca del Montsià. Por otra parte, el hemidelta izquierdo pertenece a la comarca del Baix Ebre (3.757 ha). Con todo ello, esta superficie comprende varias lagunas: Les Olles, el Canal Vell, El Garxal, l'Alfacada, la Platjola, la Tancada y l'Escanyissada. También contiene tres islas: Buda, Sant Antoni y Sapinya. Además también existen los manantiales de Baltasar, los yermos de Casablanca y, finalmente, las penínsulas del Fangar y La Punta de la Banya (Alfacs). (Pallarès, 2010)

Entrando en la particularidad del desarrollo económico del Delta del Ebro, el principal interés de su uso es la actividad económica que se desarrolla a su alrededor. Las actividades más importantes son la agricultura, la pesca, la acuicultura y el turismo. De acuerdo con Sloomweg et al. (2008), la mencionada agricultura representa el 50% de la economía de esta región, seguida del turismo (25%). Adentrándonos en las actividades agrícolas, hay que hacer hincapié en el cultivo del arroz. Estos terrenos ocupan aproximadamente el 60% de la plana deltaica. Esto hace que la producción de arroz (120.000 ton/año) que tiene lugar en el Delta del Ebro alcance ser el 98% del total de su producción en Cataluña, convirtiéndose así en el tercero más importante de Europa.

Además, existe otra industria bastante relevante, en esta área: la extracción de sal marina. Se consiguen obtener unas 70000 toneladas cada año, valor que significa el 10% del total obtenido en Cataluña.

La acuicultura, a su vez, está hiciendo en aumento. Algunas lagunas interiores que conforman el Delta son uno de los lugares más conocidos donde se puede capturar la anguila. El crecimiento de esta práctica tiene su origen, actualmente, en los mejillones (*Mytilus Galloprovincialis*) y las ostras (*Crassostrea giga*).

Sin embargo, se producen ciertos episodios de HABs (Harmful Algal Blooms) que hacen parar esta producción. Los HABs consisten en una proliferación masiva de alguna especie de algas, que producen toxinas en exceso. Estas toxinas, a su vez, son acumuladas por los organismos microfiltradores (los moluscos). Estos episodios parece que se pueden desencadenar por la resuspensión de elementos contaminantes del fondo de la bahía. Las condiciones dinámicas que producen esta resuspensión son el objeto de esta tesis.

Las bahías costeras son una amplia categoría de un tipo de ecosistema que se puede definir libremente como un medio acuático cerrado o semicerrado a lo largo de un margen de masa terrestre. Hay tipos de bahías muy diversas, que representan un espectro de diferentes grados de aislamiento físico de la costa abierta y de régimen hidrodinámico. Estos ecosistemas incluyen estuarios, lagunas, rías y fiordos. Las lagunas costeras, tales como las encontrados a lo largo del Mar Mediterráneo, son a menudo cuencas poco profundas vinculadas al margen litoral, pero que carecen de los

parámetros de estratificación y circulación de los fiordos y que suelen tener un sustrato de fondos blandos (Cembella et al., 2005)

LA BAHÍA DELS ALFACS

La bahía dels Alfacs está situada en el Delta del Ebro. Sus dimensiones se pueden resumir en 16Km de longitud y 4Km de anchura. La profundidad media es de 4m, siendo el máximo siempre inferior a 6.5m en el centro de la bahía. La bocana tiene una anchura de 2.5m, con un canal central de 6.5m y bancos de arena poco profundos de 1 o 2m a cada lado. En total, la bahía cubre una superficie de $49 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ y contiene un volumen aproximado de $153 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de agua.

Se ha formado por aislamiento parcial de un cuerpo de agua marina por una flecha litoral. Esta área, de 2.500 ha si se tiene en cuenta la barra del Trabucador, está influenciada principalmente por el agua que proviene de los campos de arroz colindantes. Un sistema de irrigación y otro de drenaje para estos campos, conforman una larga longitud de canales que terminan por desembocar en la bahía (Cerralbo, P., 2015). Durante el periodo húmedo del año, algunos autores han aproximado la descarga de agua a $10 \text{ m}^3/\text{s}$ (Canicio y Ibáñez, 1996). Sin embargo, durante la época más seca, este flujo es casi imposible de calcular dado que tan solo hay descarga debida a las aguas subterráneas que desbordan en los pozos naturales.

Aunque estos aportes representen menos del 5% de lo que el río aporta al mar, permiten que la bahía almacene unos niveles de producción biológica diez veces superior, por unidad de volumen, a las del mar circundante (Fernández et al. 1997). La bahía tiene una elevada capacidad productiva gracias al equilibrio existente entre los aportes nutritivos que recibe y el tiempo que estos residen en la bahía antes de ser evacuados al mar. Este tiempo de renovación está íntimamente relacionado con lo que se conoce como la tasa de renovación del agua. Si esta tasa fuese muy alta, los elementos nutritivos se exportarían al mar exterior con escaso aprovechamiento interno, mientras que si fuese demasiado baja, se caería en situaciones de eutrofia, es decir, una abundancia anormalmente alta de nutrientes. La eutrofización produce de manera general un aumento de la biomasa y un empobrecimiento de la biodiversidad. La proliferación de algas unicelulares o algas verdes, provocan un enturbimiento que impide que la luz penetre hasta el fondo del ecosistema. Como consecuencia en el fondo se hace imposible la fotosíntesis, productora de oxígeno libre, a la vez que aumenta la actividad metabólica consumidora de oxígeno (respiración aeróbica) de los descomponedores, que empiezan a recibir los excedentes de materia orgánica producidos cerca de la superficie. De esta manera en el fondo se agota pronto el oxígeno y el ambiente se vuelve anóxico. La radical alteración del ambiente que suponen estos cambios hace inviable la existencia de la mayoría de las especies que previamente formaban el ecosistema. Todo esto puede propiciar la aparición de HABs: la explosión demográfica de una sola especie de alga, que en muchos casos provoca la intoxicación de la fauna mayor.

Por suerte, en la bahía dels Alfacs el fraccionamiento espacial y temporal de los caudales, junto con la favorable relación superficie-volumen y un régimen de vientos adecuados, provoca una eficaz mezcla que hace que cada metro cúbico de agua dulce entrada genere una circulación diez veces mayor, lo que sitúa los tiempos de renovación en, aproximadamente, 20 días. (Fernández et al., 1997)

La estructura hidrográfica de la bahía implica la renovación de la capa de sedimento del fondo, un fenómeno primordial para el mantenimiento de los niveles de oxígeno necesarios para la vida. En los Alfacs el flujo de intercambio con el exterior oscila entre los 4 y 9 Hm³ al día, lo que implica que la renovación de la capa profunda se produce en un periodo que va de 5 a 13 días. (Fernández et al., 1997)

En condiciones desfavorables, los procesos biológicos que suceden sobre el fondo de la bahía son susceptibles de agotar el oxígeno existente en el agua del fondo en menos de 10 días. Estas circunstancias se dan cada día a finales de verano, con caudales de entrada mínimos, evaporaciones muy elevadas y altas temperaturas que favorecen los procesos biológicos de degradación de materia orgánica.

La distribución del contenido de materia orgánica en el sedimento y de fango o arcilla está íntimamente correlacionada con la batimetría de la bahía. Los valores mínimos (inferiores al 0.06 % para el sedimento fino y a 0.6% para la materia orgánica) aparecen en el sureste. En cambio, los valores máximos se dan en las profundidades máximas, es decir, en el centro de la bahía y en los canales de navegación. En estas zonas, se alcanza más del 90% de sedimentos finos y del 5.5% de materia orgánica. (Martin et al, 2000). El lecho marino es, por lo tanto, fangoso (en su gran mayoría en el centro de la bahía) y aparecen sedimentos limosos cerca de las salidas de agua dulce (Palacin et al. 1991).

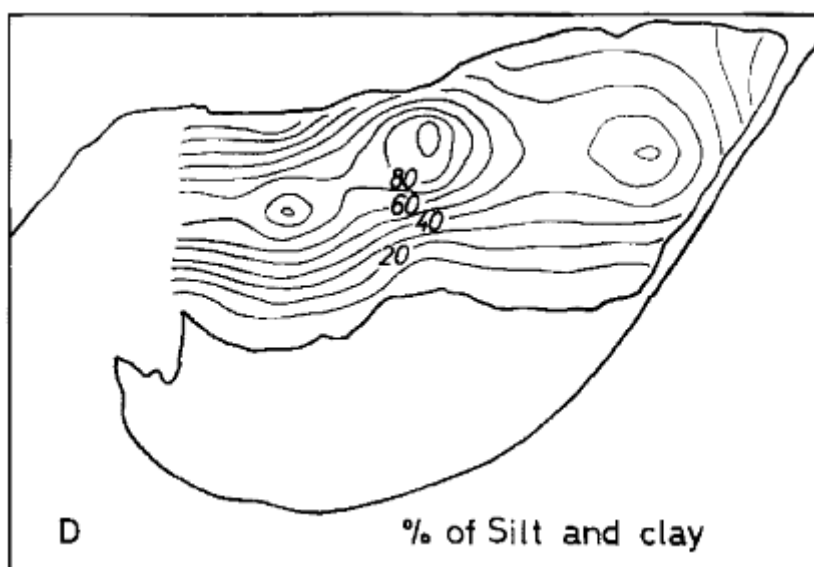


Figura 2: Análisis del tipo de sedimento que se encuentra en el fondo de la bahía. (Palacín et al., 1991)

El comportamiento de este estuario está altamente influenciado por las condiciones medioambientales. De hecho, se encuentra en una situación de lluvias importantes y

vientos fuertes, es considerado como un espacio de difícil acceso. De esta manera hay muchos aspectos climatológicos que afectan de una manera u otra la hidrodinámica de la bahía. Estas variables son el viento, la lluvia y la temperatura.

El viento sinóptico que existe en la costa catalana se ve afectada por las limitaciones orográficas del terreno, como los vientos de Tramontana (N) y Mistral (NW) provocados por los Pirineos. (Sánchez-Arcilla et al. 2008).

Concretando en la bahía, los vientos predominantes son del noroeste y del suroeste, siendo los primeros los más fuertes. Para más precisión, en verano se da un comportamiento bimodal, con dirección predominante de sur a noroeste, y siempre con vientos de poca intensidad, inferiores a 5m/s. Este patrón corresponde con las típicas brisas, muy habituales a lo largo de toda la costa catalana. Se pueden describir como vientos con ciclo diario: durante el día soplan vientos a la temperatura del mar y se alternan con vientos calmados durante las noches. En invierno, en cambio, tienen lugar vientos más energéticos (superiores a 10m/s), provenientes del noroeste. Las brisas, por su parte, no empiezan a aparecer hasta bien entrada la primavera. De todas formas, tanto en invierno como en verano los vientos más energéticos aparecen desde el noroeste. (Cerralbo et al., 2015)

La precipitación sobre esta área, en Tortosa, es de 565 mm/año para el periodo de 26 años entre 1961 y 1986. (Sainz-Elise et al. 2010). Por una parte, los meses más secos son enero, febrero, julio y agosto. En cambio, los valores más elevados se dan en Mayo, Setiembre y Octubre. La evaporación en la región es de 1000mm/año, claramente superior a la precipitación (Instituto Geográfico Nacional, www.ign.es).

Las distintas medidas de la temperatura a lo largo del tiempo en Sant Carles de la Ràpita han permitido concluir que las más elevadas tienen lugar durante los meses de Julio y Agosto, cuando la media es de unos 25°C. Las más bajas, por su lado, se dan en invierno, de forma que la media es de unos 10°C. Cabe destacar que, en observar la variación en una escala diaria, se deduce que la oscilación es importante, de unos 8°C.

La salinidad del agua durante la época más calurosa del año se distribuye de forma que aparecen elevados gradientes verticales. Estas variaciones se corresponden con las isopícnas, es decir, que el agua con mayor salinidad se encuentra en el fondo mientras que la más dulce permanece en la superficie debido a su distinta densidad. Esta estratificación es menos pronunciada en el interior de la bahía, donde la salinidad es muy inferior. (Cerralbo et al., 2015)

En cambio, cuando se estudian los datos de invierno, se observa que todo el dominio se encuentra en una situación muy mezclada. Por lo tanto, se definen isolíneas de salinidad casi verticales. En cambio, la diferencia de salinidad entre el interior de la bahía y su bocana es todavía más evidente, de forma que se origina un frente.

Así pues, durante el invierno no se observa estratificación. En cambio, es durante la época estival cuando aparece un perfil de doble haloclina (cambio por gradiente vertical de salinidad y temperatura), situadas a profundidades de 1-2m y 4-5m en la columna de

agua. Los gradientes de temperatura siguen este mismo patrón de distribución. (Llebot et al., 2013)

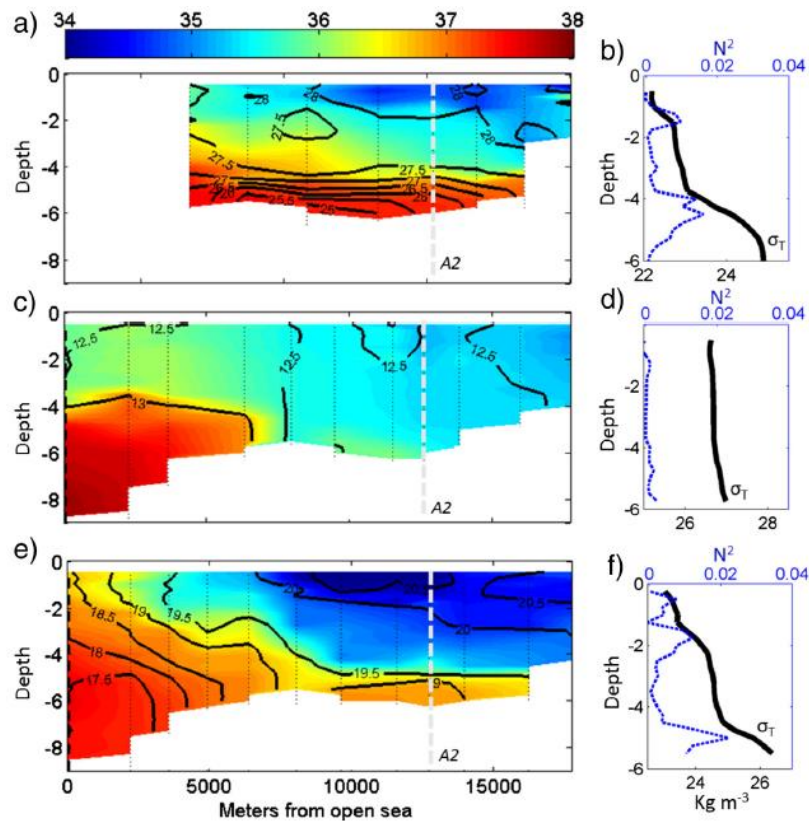


Figura 3: Temperatura (líneas) y salinidad (colores) en un perfil de la bahía, durante Julio 2013(a), Febrero 2014 (c) y Mayo 2014(e). Distribución de la densidad (línea continua negra) en un perfil vertical durante las respectivas épocas. (Cerralbo et al., 2015)

Un análisis de corrientes reveló que la dirección principal del flujo sigue los ejes de la bahía, con una periodicidad de tres horas y de una hora (Camp, 1994). A continuación se correlacionaron estos periodos con seiches, que a su vez conforman la mayor contribución al nivel del mar y las variaciones de velocidad. (Cerralbo et al., 2015).

Las seiches son oscilaciones del nivel del mar generadas por diferentes fenómenos meteorológicos, y que pueden provocar daños en la zona costera, en los barcos y en las construcciones portuarias. Cuando una masa de agua cerrada deja de estar en equilibrio por una acción externa, aparece una fuerza restauradora, la gravedad, que tiende a recuperar el estado inicial. Estas oscilaciones son ondas largas con la misma escala temporal y espacial que los tsunamis y pueden llegar a provocar efectos destructivos parecidos en la costa. A diferencia de los tsunamis, su generación no se da a partir de un forzamiento sísmico, sino que aparecen cuando coinciden de forma extrema determinados factores atmosféricos y efectos de resonancia. Dichos fenómenos suelen observarse en lagos, embalses, bahías y puertos. (Rabinovich y Montserrat, 1998).

En determinadas zonas del mundo, se han observado seiches de forma regular a lo largo de la historia. Son ejemplo de esto las bahías de Nagasaki, en Japón, el puerto de Longkou, en China, la bahía de Trieste, en Italia, el puerto de Rotterdam, en Holanda... En particular, una zona relativamente cercana es la bahía de la Ciutadella, en Menorca,

de la cual se tiene mucha información ya que a lo largo de los años se ha convertido en un centro de estudio mundial sobre este fenómeno. (Pallarès, 2010).

Gracias a la considerable mejora de los instrumentos de medida que permiten obtener datos precisos del nivel del mar cada pocos segundos, y su combinación con las nuevas tecnologías, que permiten realizar simulaciones numéricas de forma más o menos sencilla, el fenómeno de las seiches ha sido estudiado recientemente no solo en zonas donde es muy evidente su aparición, sino también en otros puntos donde, aunque tenga magnitudes menores, también genera problemas. (Pallarès, 2010).

Así pues, en la Bahía dels Alfacs este fenómeno puede aparecer, ocasionando un ascenso y descenso del nivel del mar de unos 20-30cm, con una periodicidad de 1 y 3 horas. (Cerrlabo et al., 2015) Esto comporta la aparición de unas corrientes marinas asociadas, más intensas de lo que es habitual en esta zona. No se trata de un fenómeno tan espectacular como el que se conoce en la bahía de la Ciutadella, pero si son fenómenos capaces de provocar daños en las instalaciones submarinas y pérdidas en la explotación de las mejilleras. (Pallarès, 2010).

3. Objetivos

Considerando el destacable rol económico, social y ecológico de la región, así como la importancia y relación directa que tienen algunas actividades con el agua de la bahía dels Alfacs, el principal objetivo de esta tesina es conocer, entender y describir algunos de los agentes impulsores que generan la resuspensión de sedimentos en esta bahía.

Con el fin de llegar a alcanzar este objetivo de carácter más general, se distinguen un seguido de objetivos más específicos. Estos son:

- Conocer las características geométricas, hidrodinámicas y ambientales de la bahía dels Alfacs.
- Tratar los datos obtenidos mediante la campaña del proyecto MESTRAL: descartar posibles errores de medición.
- Calcular el oleaje que tuvo lugar durante esta campaña con un método analítico.
- Calcular las tensiones en el fondo, tanto debidas al oleaje generado por el viento como debidas a las corrientes.
- Calcular la tensión crítica de Shields en el fondo.
- Identificar episodios de turbidez elevada y elaborar hipótesis de sus motivos.
- Deducir una tensión crítica sobre el fondo a partir de la cual se pueda producir la resuspensión de sedimentos y compararla con la tensión crítica calculada anteriormente.
- Concluir cuales son los mecanismos que pueden generar la resuspensión de sedimentos a partir de la observación de los episodios de turbidez identificados.

4. Material y métodos

4.1. Campaña proyecto MESTRAL

4.1.1. Introducción

Esta tesina ha podido ser realizada principalmente gracias a los datos que se han registrado durante un proyecto de investigación, de ámbito nacional, nombrado proyecto MESTRAL. El acrónimo hace referencia a “Modelling and advanced observational tEchnologies to link tranSPort processes, opTically-active constituents, and water light-field vAriability in a coastaL ecosystem”.

El principal objetivo del proyecto MESTRAL es investigar los procesos de transporte a pequeña escala que tienen lugar en la bahía del Alfacs. Con este estudio se pretende llegar a conocer cómo afecta la distribución espacial de distintos constituyentes (sedimentos, fitoplancton y materia orgánica disuelta). Se decidió localizar en la bahía dels Alfacs con el fin de mejorar el conocimiento de la circulación y fuerzas que propician el ecosistema costero que tanta importancia económica da a la región.

El estudio parte principalmente de dos recursos: un conjunto de datos obtenidos en campo con una gran resolución en cuanto a espacio y tiempo y un conjunto de modelos numéricos. El sistema de observaciones incluye una instrumentación convencional, pero también se han utilizado sistemas mucho más avanzados, como vehículos autónomos.

Dentro de este proyecto, se realizaron dos campañas de instrumentación. La primera de ellas tuvo lugar desde el 4 de Julio de 2013 hasta el 17 de Setiembre del mismo año. De ahora en adelante se distinguirá como la campaña de verano. Por otro lado, también se registraron distintos datos durante la campaña de invierno, que se inició el 25 de Febrero de 2014 para terminar el 7 de Mayo de 2014.

4.1.2. Localización

Las dos campañas estacionales se realizaron gracias a la instalación, durante estos periodos, de dos estaciones de medida. Su localización fue escogida de tal forma que una de ellas se situaba en la bocana del estuario, mientras que la otra lo hacía en el centro de la bahía. Las dos campañas constaron de estos dos instrumentos que no variaron su localización, mostrada en la Figura 4.

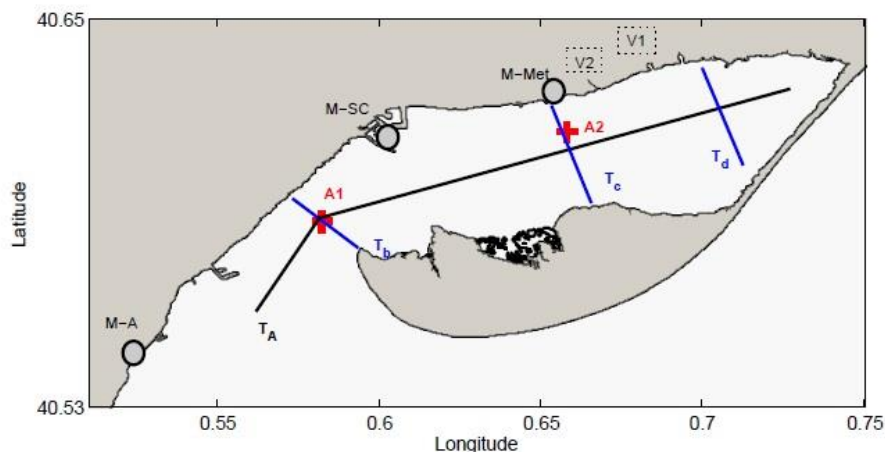


Figura 4: Localización de las campañas estacionales. A1 y A2 son las localizaciones de la instrumentación de la bocana y del centro de la bahía respectivamente. (Cerralbo, 2015)

En esta campaña también se tomaron datos de una estación meteorológica. Más concretamente, son los datos atmosféricos (viento, presión atmosférica, radiación solar y humedad) los que se han obtenido de la estación meteorológica situada en Alcanar. La localización de esta estación se ve representada en la Figura 4, donde se indica con las siglas M-A.

4.1.3. Características de las estaciones

A continuación se detallan las características de cada una de las instalaciones que se han utilizado a lo largo del estudio.

Tabla 1: Características e instrumentación de la estación A1 durante la campaña de verano.

Localización	Bocana	
Profundidad	6.5 m	
Fecha de fondeo	04/07/2013 08:00 UTC	
Fecha de recuperación	25/09/2013 11:50 UTC	
Instrumentos	Modelo	
	Medición	
	Nortek Aquadopp	Perfil de corrientes y temperatura
	OBS	Turbidez

Tabla 2: Características e instrumentación de la estación A2 durante la campaña de verano.

Localización	Bahía	
Profundidad	6.5 m	
Fecha de fondeo	04/07/2013 08:00 UTC	
Fecha de recuperación	25/09/2013 11:40 UTC	
Instrumentos	Modelo	
	Medición	
	Nortek Aquadopp	Perfil de corrientes y temperatura
	OBS	Turbidez

Tabla 3: Características e instrumentación de la estación A1 durante la campaña de invierno.

Localización	Bocana	
Profundidad	6.5 m	
Fecha de fondeo	25/02/2014 08:00 UTC	
Fecha de recuperación	31/03/2014 11:20 UTC	
Instrumentos	Modelo	Medición
	Nortek Aquadopp	Perfil de corrientes y temperatura
	OBS	Turbidez

Tabla 4: Características e instrumentación de la estación A2 durante la campaña de invierno.

Localización	Bahía	
Profundidad	6.5 m	
Fecha de fondeo	25/02/2014 08:00 UTC	
Fecha de recuperación	19/05/2014 11:20 UTC	
Instrumentos	Modelo	Medición
	Nortek Aquadopp	Perfil de corrientes y temperatura
	OBS	Turbidez

Tabla 5: Características e instrumentación de la estación meteorológica de Alcanar.

Localización	Les Cases d'Alcanar
Altitud	10m
Fecha de fondeo	26/06/2012
Fecha de recuperación	08/05/2014
Instrumento	Medición
Anemómetro	Temperatura y viento

El sistema de fondeo para cada uno de las dos instalaciones puede observarse en la Figura 5.

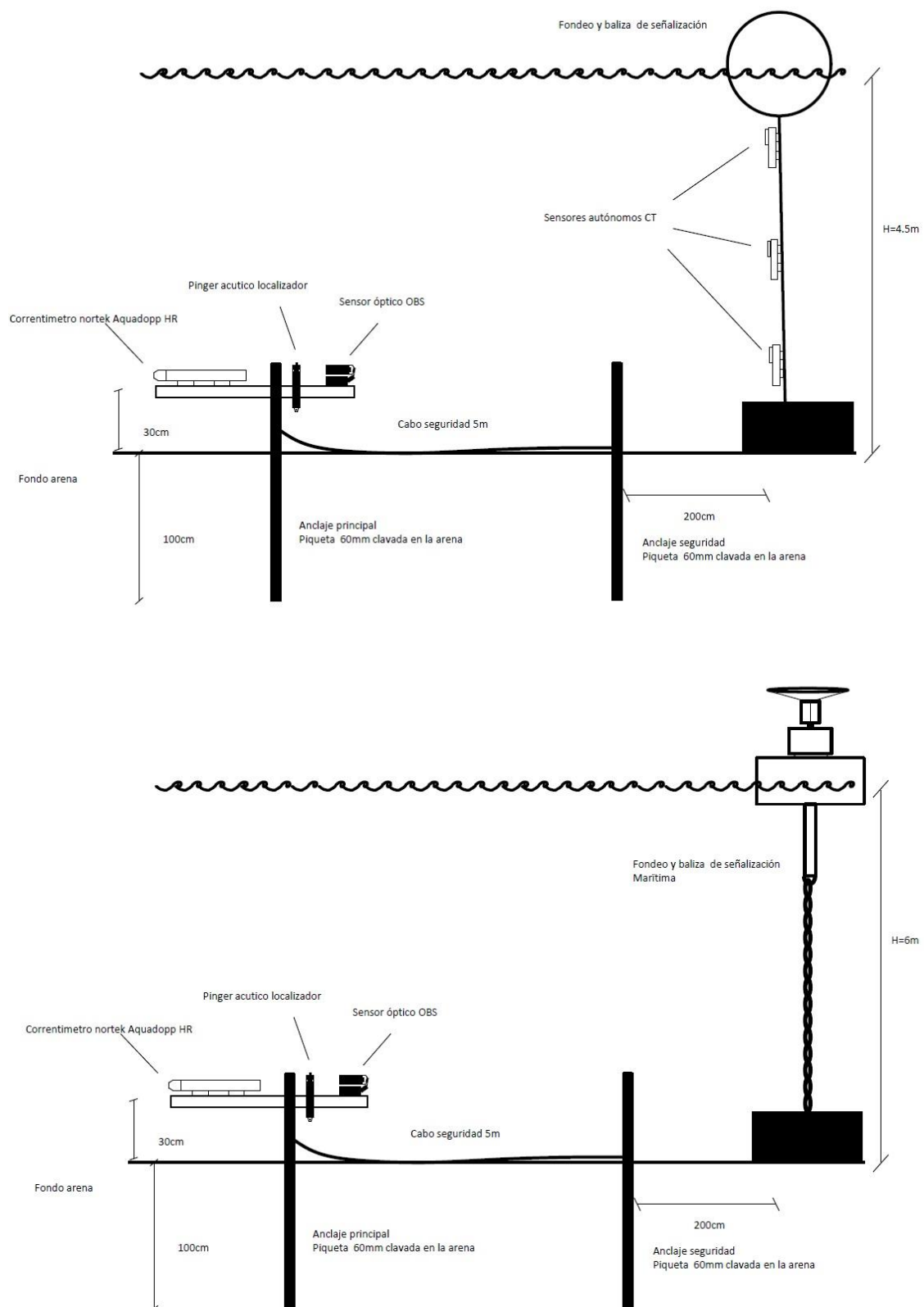


Figura 5: Sistema de fondeo empleado en la estación de la bahía (arriba) y en la bocana (abajo). Fuente: Joan Puigdefàbregas, Jordi Catura y Quim Sospedra (Laboratori d'Enginyeria Marítima)

4.1.4. Características de los instrumentos

En este apartado se quiere detallar las propiedades más características de los elementos de medición instalados. También se desea describir de una forma bastante resumida, el funcionamiento de éstos.

Nortek Aquadopp:

Este dispositivo (Figura 6), comercializado por la empresa Nortek, es un perfilador empleado durante las dos campañas de medición (verano de 2013 e invierno de 2014). Fue empleado en ambas instalaciones (en el medio de la bahía y en la bocana).

Este instrumento, introducido en el mercado en el año 2000, supuso la aparición de una nueva generación de perfiladores de corrientes. Funciona utilizando el método de autocovarianza para asegurar datos precisos y fiables, conservando las ventajas tradicionales de los sistemas acústicos Doppler, como la insensibilidad a la bioacumulación o la ausencia de partes móviles o protuberantes. Como principales ventajas cabe destacar sus 2.4 kg de peso, que permite llevar fácilmente más de uno en cada brazo, y su sencillo sistema de fondeo, que permite su instalación en emplazamientos no viables hasta su aparición. La electrónica del sistema integra la velocidad Doppler con sensores de temperatura, presión, inclinación y orientación. Trabaja bien tanto en aguas superficiales como en aguas con partículas en suspensión, como puede ocurrir cerca de la costa o en ríos [www.nortek-es.com].



Figura 6: Perfiladores Aquadopp en sus diferentes configuraciones del cabezal. [www.nortek-es.com]

De esta forma, se utiliza la tecnología de un ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*), de 2 MHz de frecuencia acústica, con el fin de tomar los datos que se refieren a las corrientes. La técnica se basa en una detección acústica de las partículas suspendidas en el agua a través de 4 transductores, uno vertical y los otros 3 situados con una inclinación de 25º respecto a la vertical. Al emitir un impulso desde cada uno de los transductores, las partículas en suspensión producen ecos que son percibidos por el ADCP, permitiendo así estimar la magnitud y dirección de la corriente [Pedersen et al., 2004].

En el presente estudio, ambos ADCPs se configuraron de tal forma que se registran 10 registros por minuto. A continuación, el mismo instrumento hace una media de todas estas mediciones cada 10 minutos. Las celdas que tiene en cuenta son de 25cm. Además,

se equiparon ambos instrumentos con sensores capaces de tomar medidas de presión y temperatura. La precisión de los registros es de un 1% del valor medido $\pm 0.5\text{cm/s}$. Ambas estaciones se instalaron con los ADCPs a 6.5m de profundidad y con una distancia desde el fondeo de 0.4m. Se ha decidido tener en cuenta solamente aquellas mediciones que pertenecen a las celdas comprendidas entre la primera de ellas y hasta la que se encuentra a 0.5-1m de la superficie. Es decir, solo se usan 20 celdas de un total de 25.

OBS:

En términos generales, la turbidez es una propiedad que nos describe la claridad del agua, aportando datos relevantes sobre la cantidad de material en suspensión así como de las sustancias disueltas en él. El hecho que existan variaciones en los resultados de la turbidez en función de la modalidad usada para su detección (como la atenuación de la luz, la retrodispersión acústica o la dispersión óptica), hace que este fenómeno haya pasado a ser definido basándose en los métodos ópticos de medidas [Tamburri et al., 2006].

El OBS es un instrumento capaz de medir la turbidez del agua. Con ello se pretende, más adelante, estudiar los sólidos en suspensión que se hallan en la bahía. Las siglas que designan el nombre deben su origen a la palabra inglesa “Optical Backscatter Sensor”, que se traduce como sensor óptico de retrodispersión.

Para su correcto funcionamiento, dispone de un emisor de infrarrojos de alta densidad (IRED). A continuación, un detector compuesto por cuatro fotodiodos, cuyo diámetro y longitud miden unos 20cm y 50cm respectivamente, mide la radiación infra-roja dispersada por la materia suspendida en el agua en ángulos de entre 140 y 165° [Downing et al., 1981]. La medida, forma y tamaño de estos sólidos en suspensión tiene una influencia directa en la respuesta del OBS [Van Rijn et al., 2000].

Todos los sensores OBS trabajan de la misma forma, la cual es bastante sencilla. La muestra de agua es iluminada, y los fotodetectores del sensor son los responsables de convertir la luz dispersada por la muestra en corriente fotoeléctrica. La cantidad de esta corriente depende principalmente del área de las partículas que es iluminada, y dado que el volumen de una partícula se puede expresar proporcionalmente a su área, la corriente fotoeléctrica es un indicador que estima, de forma indirecta, la concentración de sedimento en suspensión. (Downing, John, 2006).

La relación entre la señal OBS y la concentración de sedimentos es casi linear, característica que hace que los OBS sean tan importantes para sus usuarios. Sin embargo, hay muchos factores que influyen en las medidas que toman los OBS:

- Tamaño de la partícula, forma, composición y agregación/floculación.
- Materia disuelta que es capaz de absorber la luz.
- Burbujas
- Composición química y biológica

Algunos de estos factores pueden suponer un problema, ya que los datos que proporciona el OBS pueden ser de dudosa calidad o incluso resultados ambiguos. En

consecuencia, si estos factores son ignorados, se llegarán a obtener resultados muy poco precisos (Downing, John, 2006).

Así pues, todas las conclusiones en relación a la turbidez, deberán ser sometidas a este seguido de factores que pueden afectar los resultados.

Estación meteorológica:

La estación a partir de la cual se han obtenido los datos meteorológicos que requería conocer esta tesina, provienen de una Estación Meteorológica Automática (EMA). Se dice que es automática dado que los distintos instrumentos que la componen transmiten o registran automáticamente las observaciones, realizando directamente, si necesario, la conversión a la clave correspondiente o realizando esta misma operación en una estación transcriptor. [www.meteo.cat]

En general, una EMA consiste en un sistema de adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos (habitualmente se usa la terminología inglesa y se llama *datalogger*), una serie de sensores para medir distintas variables meteorológicas, un sistema de comunicaciones (vía modem, radio, satélite, etc.) y un sistema de alimentación (que puede ser autónomo y abastecerse de energía solar o bien estar conectado a la red eléctrica). [www.meteo.cat]

Los sensores que incorpora una EMA dependen básicamente de la aplicación que se le quiera dar a la misma estación. Existen sensores bastante específicos, como el de humectación (aplicaciones agrometeorológicas) o el espesor de nieve (nivológicas), y otros más generales, como el de temperatura ambiente o humedad relativa. [www.meteo.cat].

Uno de los sensores que incorpora la estación meteorológica de Alcanar (

Figura 7) es el que mide la dirección y velocidad del viento, el anemómetro. Se instala el sensor a una altura de 10m con el fin de minimizar los efectos del suelo en el flujo horizontal del aire. Para obtener la velocidad del viento (en m/s) no se utiliza la tradicional rotación de las hélices o cucharas, sino que este tipo de anemómetro aprovecha los ultrasonidos. Toma en el rango de 0 a 60m/s, con una precisión de $\pm 2\%$, una resolución de 0.01m/s y un tiempo de respuesta de 0.25 segundos.



Figura 7: Imágenes de la estación de Alcanar.

Al mismo tiempo, es capaz de registrar, evidentemente, los datos referentes a la dirección del viento con una amplitud de 360° , también con una precisión de $\pm 2\%$. En este caso la resolución es de 1° y el tiempo de respuesta de 0.25 segundos otra vez.

Para comprobar el correcto funcionamiento de la estación en todo momento, se transmiten datos del sensor de viento junto con código que informa sobre el estado del instrumento. Las dimensiones de este anemómetro son de 142mm x 160mm, con un peso de tan solo 0.5Kg. Resiste temperaturas de un gran rango, de -35° a $+70^\circ\text{C}$. De la misma manera, puede trabajar bajo condiciones de humedad que se encuentren entre el 5% y el 100%.

Además de la dirección y velocidad del viento, la estación meteorológica de Alcanar también es capaz de medir la presión atmosférica (es decir, la fuerza ejercida por unidad de superficie por la atmósfera terrestre. El Sistema Internacional fija su unidad de medida en Pascales (Pa). Es por ello, que la estación expresa los datos en hectoPascales (hPa). Para su medición, se emplean barómetros capacitivos. Estos sensores se basan en la variación de un diafragma flexible, que se deforma en función de la presión aplicada.

Esta deformación del diafragma se amplifica y se transforma en un valor de voltaje (0-1V) o intensidad (4-20mA) proporcional a la presión atmosférica. [www.meteo.cat]

Finalmente, la última medida que toma esta estación es la temperatura del aire. Esto se hace aprovechando los cambios que se producen en ciertas resistencias en función de la temperatura, que tiene lugar de forma más o menos lineal. Los sensores no miden directamente el valor de esta resistencia, sino que la calculan de manera indirecta aplicándole una pequeña intensidad (del orden de mA) para obtener, a partir de la Ley de Ohm ($V=R \cdot I$) el valor de un voltaje proporcional a la temperatura (0V equivalen a -40°C y 1V equivale a 60°C). [www.meteo.cat]

4.2. Procesado y control de calidad de los datos

4.2.1. Introducción

Este subcapítulo tiene su interés al ser la base del posterior análisis de las series temporales. Dado que los datos han sido obtenidos directamente de los instrumentos, estos pueden contener distintos tipos de errores. Con el fin de no tenerlos en cuenta en el momento de obtener conclusiones, ha sido necesario realizar previamente este control de calidad.

4.2.2. Generalidades

Los motivos que suelen conducir hacia los errores en las series de datos son comunes en la mayoría de instrumentos, independientemente de sus propiedades. A continuación se han querido mencionar estas generalidades, para después poder entrar en detalle según cada instrumento, estación y serie temporal.

En primer lugar, se tiene en cuenta el factor debido a la instalación inicial de cada instrumento y su posterior retirada. Los instrumentos que sufren este efecto son tan solo aquellos que no son permanentes. Es por este motivo que los datos de la estación meteorológica no reflejan esta alteración. En cambio, cuando el encendido y apagado se efectúan *in situ*, es decir, antes y después de ser introducido y retirado del agua, las primeras y últimas medidas del aparato no son válidas. Es el caso de los instrumentos que componen la campaña de verano y de invierno promovida por el proyecto MESTRAL.

A modo de ejemplo, la Figura 8 ilustra este fenómeno, para que se pueda entender de una forma más sencilla y clara.

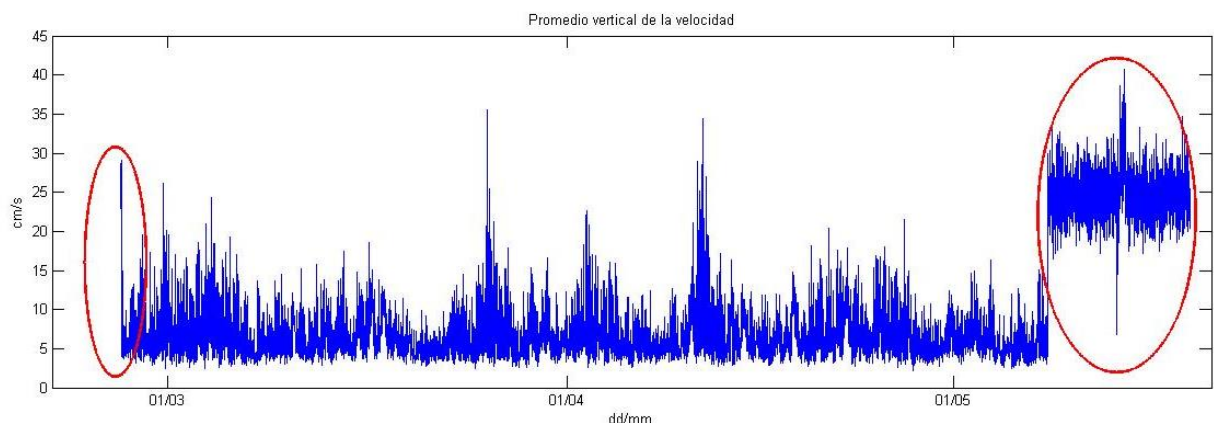


Figura 8: Promedio vertical de la velocidad para la campaña de invierno, en el centro de la bahía.

En consecuencia, estos datos no se tendrán en cuenta en lo que sigue del estudio. Con ello, se ha querido unificar el periodo temporal analizado. De esta manera, se ha decidido que todos los instrumentos sean utilizados tan solo entre las fechas comprendidas entre el día 4 de Julio de 2013 y el día 17 de Setiembre de 2013 para la campaña de verano. En cuanto a la de invierno, se tendrán en cuenta todos aquellos datos que se hayan registrado entre el 25 de Febrero y el 19 de Mayo de 2015.

Además, aunque la estación meteorológica no se ve afectada por este motivo como ya se ha mencionado anteriormente, se ha querido unificar el periodo temporal analizado. Es por ello que aunque se dispone de valores también válidos fuera de estos intervalos de tiempo, no se utilizarán en el estudio.

En segundo lugar, se observan picos inesperados en los registros tomados por los instrumentos. Su origen se debe, normalmente, a factores externos al funcionamiento del propio aparato. Un ejemplo de esto se puede encontrar en los sensores OBS. Cuando pasa algún animal u objeto por la trayectoria de un sensor óptico de retrodispersión, los datos que éste toma son incorrectos y no hay que tenerlos en cuenta.

En la Figura 9 se pueden observar varios picos cuya explicación viene dada por el segundo factor mencionado:

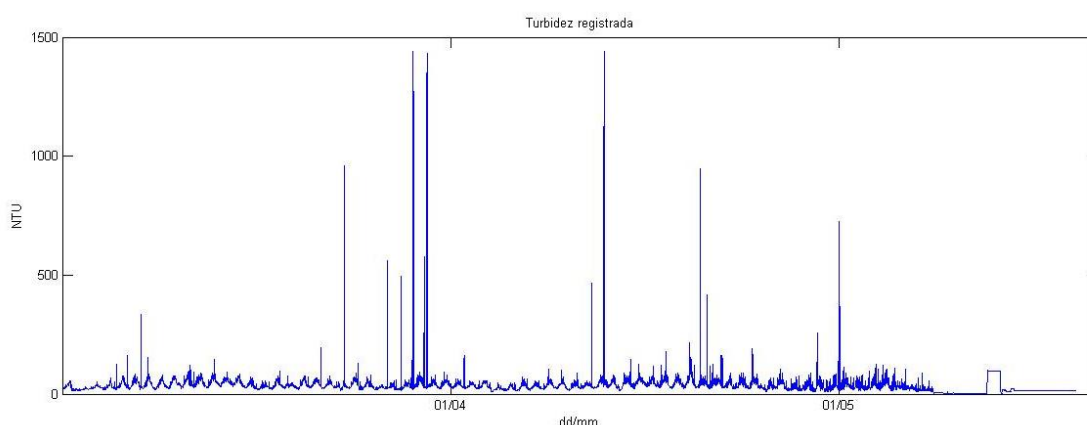


Figura 9: Turbidez registrada por el OBS de la bocana durante la campaña de invierno.

Además de estos factores generales en todos los instrumentos, también existen algunos errores en las mediciones que son características de cada aparato. Por ejemplo, los sensores OBS experimentan una subida exponencial de la turbidez registrada durante las últimas mediciones. Su motivo radica en la acumulación de suciedad alrededor del sensor.

Para poder eliminar estos errores, a continuación se prosigue al control de calidad individualizado para cada tipo de medida. Con el fin de eliminar las alteraciones, se procederá a corregir y filtrar todos aquellos datos que lo requieran.

4.2.3. Meteorología

En este apartado se procesan los datos extraídos de la estación meteorológica de Alcanar. Esta estación proporciona datos de velocidad de ráfaga de viento, velocidad media del viento, dirección media del viento (de dónde sopla) y presión atmosférica.

Los datos que se registraron fueron desde el 1 de Junio de 2013 hasta el 8 de Mayo sin interrupción, dado que se trata de una estación fija. Sin embargo, tal y como se menciona en el inicio del capítulo, solo se tendrán en cuenta las fechas iguales a los demás sensores para analizar un intervalo de tiempo homogéneo en todos los instrumentos. Así, solamente se estudian los datos comprendidos entre el 4 de Julio y el 17 de Septiembre, para la campaña de verano de 2013; y también aquellos registrados entre el 25 de Febrero y el 7 de Mayo para la campaña de invierno de 2014.

La estación toma registros cada 10 minutos. En total, por lo tanto, se tendrán en cuenta 10943 datos de cada tipo para la campaña de verano y 10367 más para la de invierno. No ha sido necesario aplicar ningún tipo de corrección sobre este conjunto de datos.

4.2.4. Corrientes

Los datos que se han medido en relación a las corrientes son la componente N-S y E-W en ambos puntos de medida. Más concretamente, se dispone de una medida para cada celda, es decir, a profundidad distinta. Al tener en cuenta que cada celda tiene un espesor de 25cm, es posible deducir que las celdas superiores (entre la 20 y la 25) pertenecen a datos muy cercanos a la superficie del agua o bien ya en el aire. Es por este motivo que estos valores no se usarán en los análisis.

Cada uno de estos registros tomados para cada celda y en cada instante de tiempo (10 registros por minuto y sucesiva media cada diez minutos), no son todos relevantes para el presente estudio. Tan solo es interesante trabajar teniendo en cuenta la velocidad en el fondo y el promedio vertical de la zona.

En total, existen 11975 valores registrados para cada celda y para cada instrumento durante la campaña de verano. En cuanto a la de invierno, existen 11951 medidas para la estación del centro de la bahía. Sin embargo, la estación de la bahía solo contiene 4925 datos. Esto es debido a que el aparato de medida se estropeó. A pesar de ello, en este caso en particular se han seguido teniendo en cuenta las mediciones que registró la bahía en vez de igualar los periodos de tiempo ya que los demás instrumentos también disponen de estos registros y tan solo es uno de ellos el que no los tiene.

Todos los registros de la velocidad del corriente fueron tomados en dos componentes. Los datos tomaban valores positivos cuando las componentes eran en dirección Este y Norte. Por el contrario, eran negativos cuando hacían referencia a direcciones en sentido Oeste y Sur. A partir de cada par de datos fue posible calcular el módulo de la

velocidad (1). Además, los datos registrados estaban expresados en m/s, y se decidió proceder a su conversión a cm/s para poder disponer de valores más manejables.

$$M = \sqrt{U^2 + V^2}$$

(1)

Dónde:

M= módulo de la velocidad de la corriente.

U= componente Este / Oeste de la velocidad de la corriente.

V= componente Norte / Sur de la velocidad de la corriente.

Para tratar los datos referentes a la dirección de las corrientes también ha sido necesario hacer un pequeño cálculo. Para este, ha sido necesario tener en cuenta que la dirección de un corriente siempre se sobreentiende como aquella hacia donde se dirige, no de donde viene (al contrario de la convención que se utiliza para analizar los datos de viento). Además, se debe mantener el Norte como el eje de referencia, los 0º, que a continuación aumentan en el sentido de las agujas del reloj. El cálculo, por lo tanto, depende del cuadrante en que se encuentra la velocidad, identificable según el signo de las componentes U y V. (Figura 10)

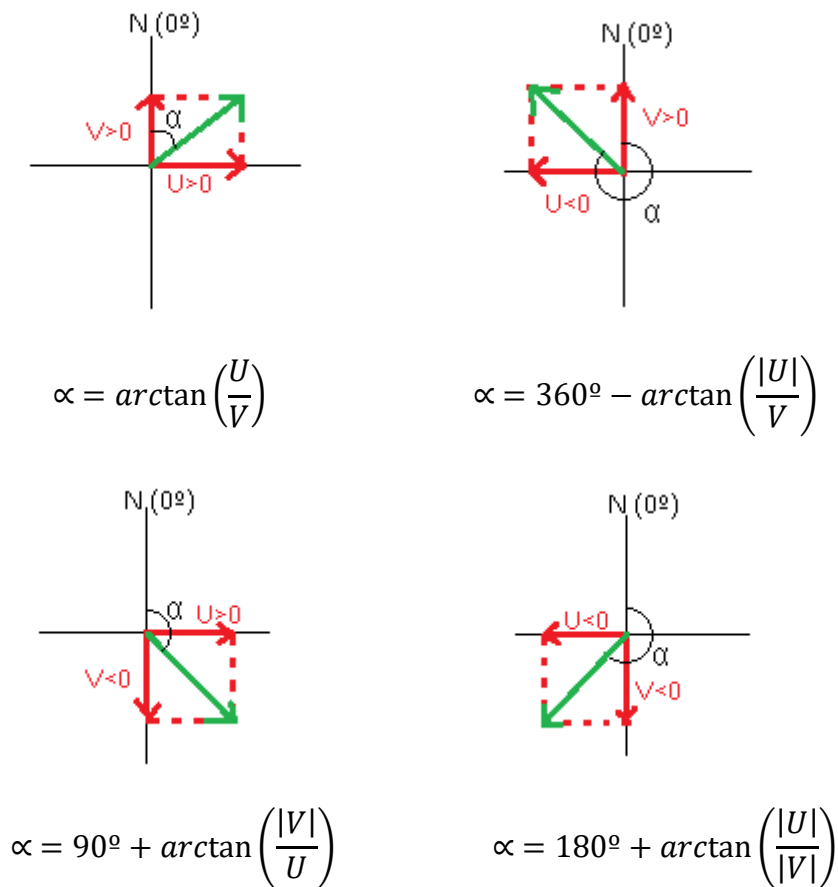


Figura 10: Cálculo de la dirección de las corrientes

El control de calidad de los datos de corrientes desvela que los valores obtenidos en cada uno de los instrumentos no superan en ningún momento los rangos de medidas. Además, estos datos de corrientes son uniformes. Esto significa que no contienen errores de medición.

4.2.5. Turbidez

En este apartado se detalla cómo han sido tratados los datos referentes a la turbidez. Como ya se ha explicado anteriormente, se dispone de dos sensores OBS, pertenecientes al proyecto MESTRAL. Estos se sitúan en el centro de la bahía y también en la bocana.

Como en el caso de las corrientes, no se observa ningún valor fuera del rango de medición de los instrumentos, que se halla entre 0 y 4000NTU. Sin embargo, los sensores OBS no proporcionan directamente valores de turbidez. Para obtener estos valores específicos, es necesario aplicar un seguido de operaciones.

Para empezar, hay que transformar los datos propios del instrumento a unidades de voltaje. En ambos instrumentos la expresión utilizada es la misma, correspondiente a la calibración de los instrumentos. Es la que se cita a continuación.

$$V_1[mV] = dato * \frac{5000}{65535}$$

(2)

La ecuación (2) ha sido obtenida a base de multiplicar el valor máximo de los datos de cada instrumento por sus 5000 mV de voltaje correspondiente. A continuación es necesario dividir este resultado por el número total de valores posibles que dispone cada instrumento.

Después, una vez obtenidos los datos de voltaje, éstos se transforman en unidades de turbidez. Esta propiedad se mide en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU). Esta unidad corresponde con una concentración del producto utilizado como patrón llamado Formacina. Es una solución que se puede crear fácilmente a partir de Sulfato de Hidracina y Hexamitelentraamina, en proporciones conocidas, para formar el patrón de turbidez de 400NTU.

Las expresiones (3) y (4) expresan la transformación mencionada, que es descrita por el fabricante del instrumento. Los coeficientes que figuran en ellas dependen de la calibración de cada instrumento. La primera de ambas ecuaciones corresponde al sensor OBS situado en el centro de la bahía, mientras que la segunda hace referencia al sensor de la bocana.

$$NTU = -0.2854359 + 0.1802474 * v_1 + 2.16 * 10^{-5} * v_1^2$$

(3)

$$NTU = -0.1580691 + 0.1717459 * v_1 + 2.37 * 10^{-5} * v_1^2 \quad (4)$$

Una vez hechos todos estos cálculos, ha sido posible representar los datos definitivos de turbidez.

5. Resultados

5.1. Análisis de las series temporales

5.1.1. Introducción

En este capítulo se va a dar una breve explicación sobre los datos que se han validado anteriormente. El objetivo de la tesina, es decir, el estudio de la resuspensión de sedimentos, está íntimamente relacionado con cada uno de los factores que se analizan a continuación. Para empezar, se analizan las series de datos de cada estación por separado. Seguidamente, se realiza un resumen de cada factor en el que se da un punto de vista general, con el fin de sintetizar las conclusiones.

5.1.2. Meteorología

Los registros que proporcionan conocimiento sobre las características del viento se han obtenido de la estación meteorológica de Alcanar. Para comprenderlos, es necesario conocer el nombre que reciben los vientos en función de su dirección. Los nombres son típicos de la zona.

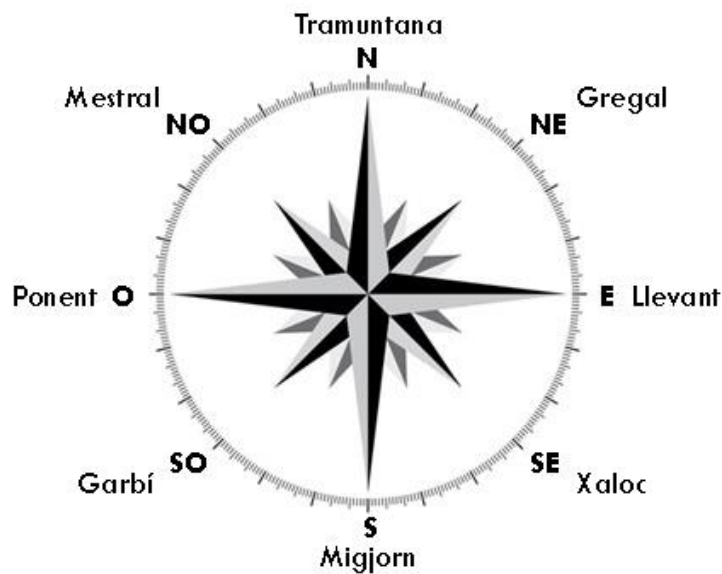


Figura 11: Rosa de los vientos

Campaña de verano de 2013

Si se observa la

Figura 13, en la que queda plasmada la evolución de la velocidad media del viento, así como su dirección, el elemento más destacable es su periodicidad. En verano, las brisas son muy comunes en el Mar Mediterráneo. Aparecen vientos con un ciclo diario. Durante el día, aparece un viento frío que se desplaza desde la masa de agua hasta la tierra. Por la noche, el proceso tiene lugar de forma inversa, aunque en este caso los vientos son más suaves.

La bahía dels Alfacs se ve afectada diariamente por las brisas. Las brisas son muy habituales en verano en el Mediterráneo. Se dan cuando el sol, durante el día, calienta la Tierra y las masas de agua. La Tierra, evidentemente, se calienta más rápido que el mar, pero también conserva el calor durante menos tiempo. En consecuencia, durante el día la mayor temperatura de la tierra da lugar a que el aire calentado ascienda, y rápidamente es sustituido por aire más frío procedente del mar. Cuando llega la noche se alcanza un equilibrio igualándose las temperaturas. A continuación, durante la noche, el proceso tiene lugar de forma inversa aunque se produce de forma más lenta porque las diferencias no son tan grandes.

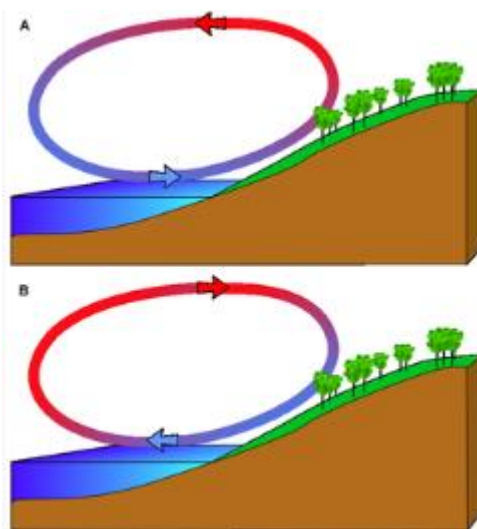


Figura 12: Diagrama de formación de la brisa marina. La figura A es la brisa marina diurna, mientras que la figura B explica la brisa marina nocturna. [www.wikipedia.com]

Las brisas que aparecen durante el día llegan a ser de unos 6m/s. En cambio, por la noche estos valores descienden hasta unos 2m/s. De la misma manera, se observa este patrón en la dirección del viento. Su evolución es en sentido horario, ya que a primera hora del día suelen ser vientos de Migjorn (del Sur) y van girando durante el día hasta ser vientos de Mestral (NW).

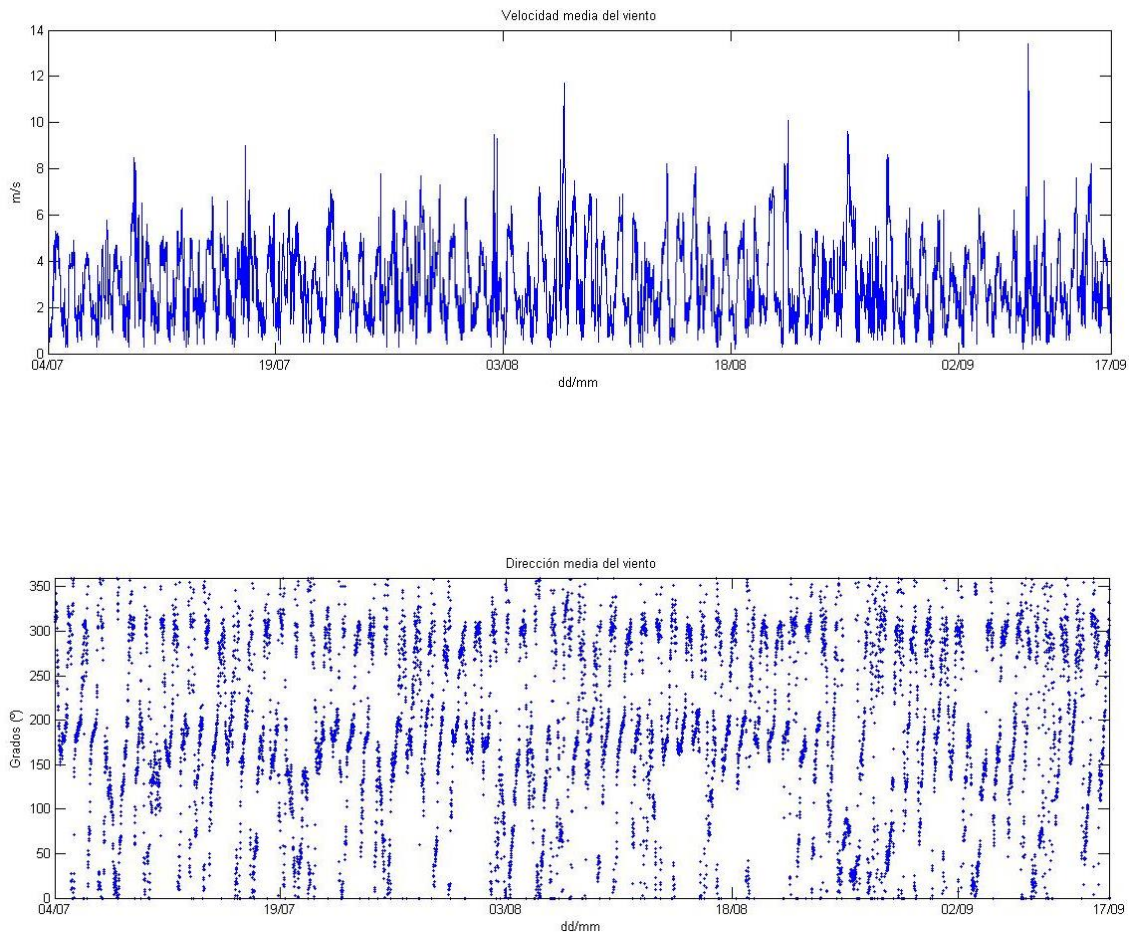


Figura 13: Velocidad y dirección media del viento

En cuanto a los picos que presenta la velocidad del viento durante esta época, es destacable que, a principios de agosto existe un máximo. En este caso, se trata de un viento de 10m/s. Además de este particular pico, existen otros que pueden variar entre un valor de 8 y 14 m/s. En cuanto a las direcciones, se puede deducir que en aquellos instantes en que existe una alta intensidad del viento, la dirección es de entre 0º y 100º, es decir, vientos de levante principalmente.

Gracias a la rosa de los vientos, en la que se dibuja a la vez la dirección de los vientos, su intensidad y la frecuencia con la que se dan, se observa como durante la campaña de verano, el viento que sopla de más intensidad proviene del NW; se trata de los vientos de mestral. Sin embargo, los más leves o aquellos con una intensidad media, que son la mayoría, proceden del NE y del S, son vientos de levante, gregal y Migjorn.

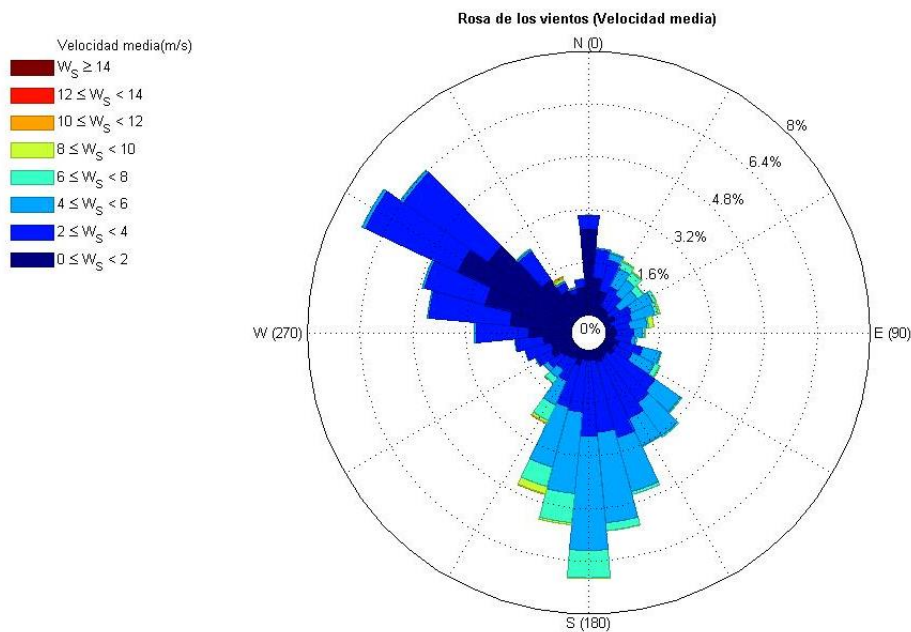


Figura 14: Rosas de los vientos para la velocidad media.

Campaña de invierno de 2014

Era de esperar que esta campaña fuera más irregular que la de verano, porque es sabido que en invierno se producen vientos más fuertes y más a menudo, a la vez que desaparecen las brisas de verano.

Tienen lugar muchos picos alrededor del 25 de Marzo, llegando a ser de hasta 14m/s. Además, aparecen otros picos parecidos los días 25 de Febrero y 17 de Abril. Finalmente, el resto de la serie temporal está compuesta por picos más variables, de entre 6 y 8 m/s. En cuanto a las direcciones del viento que se han registrado, permiten deducir que aquellos vientos cuya intensidad es mayor provienen de 300º (vientos de mestral), pero en otros casos, también provienen de entre 0 y 50º (vientos de levante).

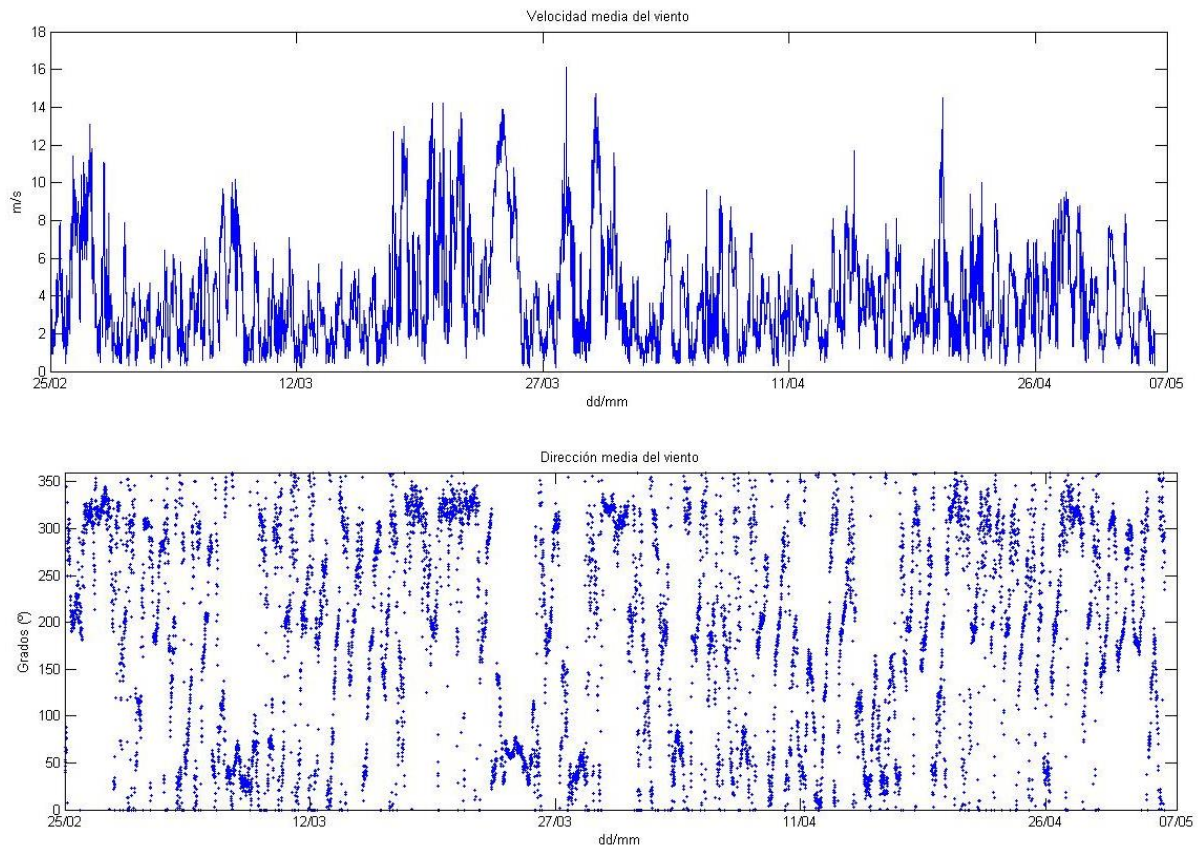


Figura 15: Velocidad y dirección media del viento.

Las rosas de los vientos permiten verificar lo que la Figura 15 ya explica. Por un lado, los vientos más intensos son procedentes del NW. En cambio, hay muchos vientos con una intensidad media que proceden del Sur.

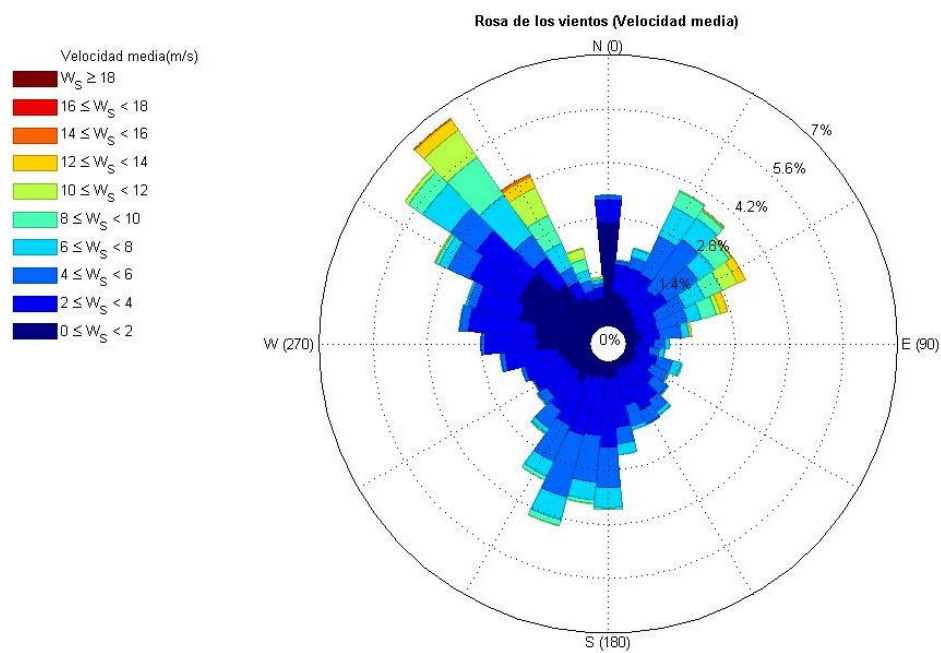


Figura 16: Rosas de los vientos para la velocidad media.

Síntesis

Estos últimos datos obtenidos gracias a la estación meteorológica de Alcanar permiten identificar los vientos más intensos producidos durante las campañas observadas. Además de identificar las direcciones de los vientos más intensos, al mismo tiempo se han podido describir los más habituales, aunque sean de menor intensidad.

5.1.3. Oleaje

En ninguna de las campañas se localizaron instrumentos permitían tomar medidas sobre oleaje. Sin embargo, estos datos son imprescindibles a la hora de lograr elaborar un análisis de la resuspensión de sedimentos que tenga en cuenta todas las variables que afectan sobre ello.

Los valores más importantes que sería necesario conocer son la altura significativa (H_s), el periodo pico (T_p) y la dirección de propagación del oleaje.

La altura significativa de la ola se puede obtener mediante un método analítico de previsión del oleaje debido al viento. Dado que la profundidad en la bahía es casi constante y de 6m, es trivial considerar que se trata en todo momento de aguas someras o de poca profundidad (más tarde se verificará esta hipótesis al comprobar que la profundidad es inferior a una veintena parte de la longitud de onda).

En aguas someras, la altura significativa de ola originada por los vientos generadores (de los cuales la estación meteorológica proporciona datos) se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$H_s = 0.283 * \frac{U_A^2}{g} * \tanh \left[0.53 \left(\frac{g \cdot d}{U_A^2} \right)^{\frac{3}{4}} \right] * \tanh \left[\frac{0.00565 * \left(\frac{g * L_f}{U_A^2} \right)^{1/2}}{\tanh \left[0.53 * \left(\frac{g \cdot d}{U_A^2} \right)^{3/4} \right]} \right] \quad (5)$$

De la misma forma, existe otra ecuación que permite hallar el periodo pico de las olas, el cual depende de las mismas variables que la altura de ola significativa:

$$T_p = 7.54 * \frac{U_A}{g} * \tanh \left[0.833 \left(\frac{g \cdot d}{U_A^2} \right)^{\frac{3}{8}} \right] * \tanh \left[\frac{0.0379 * \left(\frac{g * L_f}{U_A^2} \right)^{1/3}}{\tanh \left[0.833 * \left(\frac{g \cdot d}{U_A^2} \right)^{3/8} \right]} \right] \quad (6)$$

Las ecuaciones (5 y (6 corresponden al método simplificado paramétrico desarrollado por Bretschneider y Reid (1953) y modificado por Ijima y Tang (1966). Se basa en el balance entre la energía cedida por el viento al oleaje y la sustraída por fricción de fondo

y percolación, sin tener en cuenta la limitación del oleaje por duración de actuación del viento.

Las variables que aparecen en esta formulación son:

- La velocidad del viento U_A en m/s
- La aceleración de la gravedad $g=9.81\text{m/s}^2$
- La profundidad $d=6\text{m}$
- El fetch o longitud sobre la que actúa el viento generador de las olas. (L_f)

El fetch ha sido aproximado gracias a la posición de ambas estaciones tal y como se muestra en la *Figura 17*.

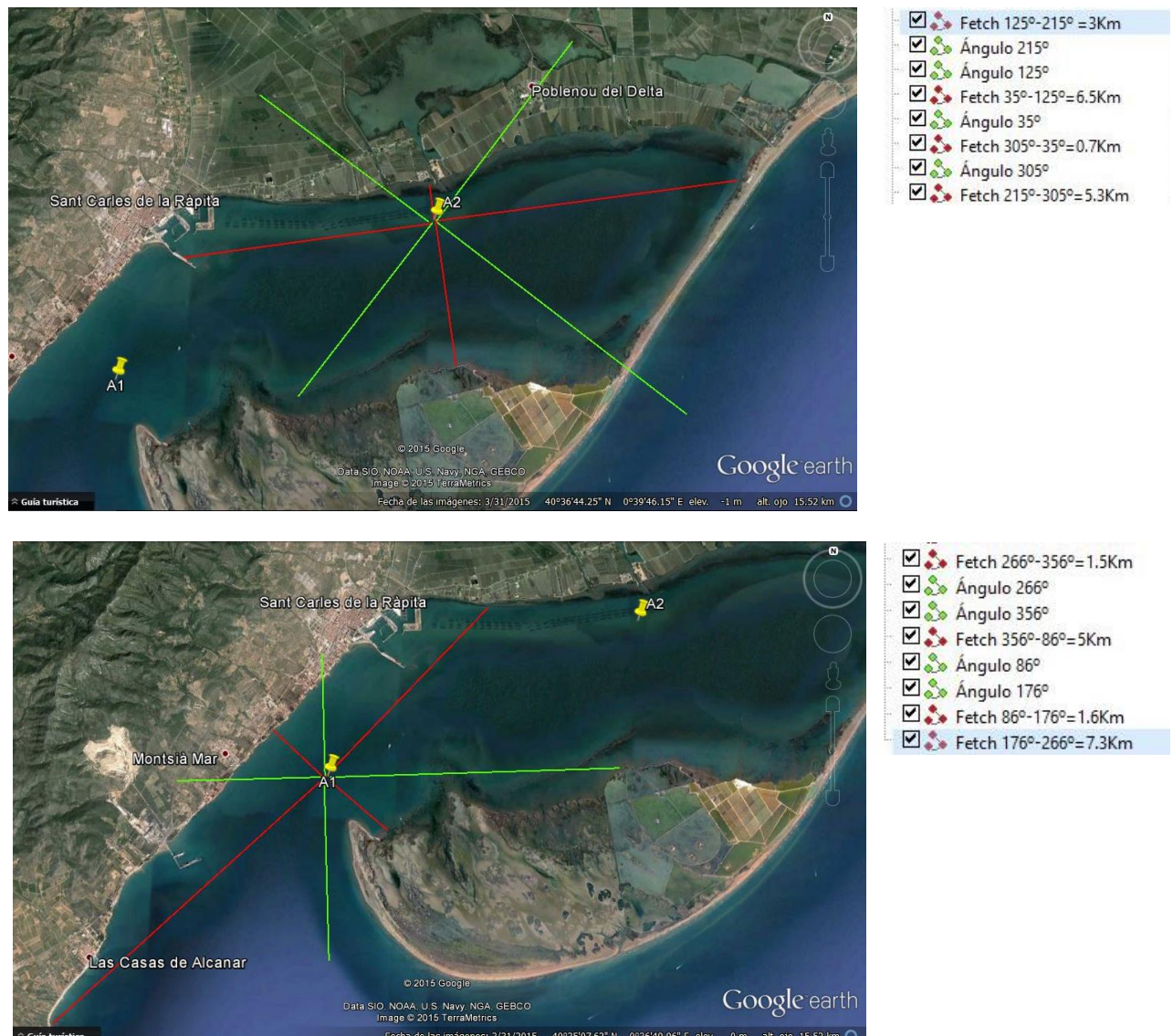


Figura 17: Fetch según la dirección del viento para la estación de la bahía (arriba) y la de la bocana (abajo).

Hay que tener en cuenta que, para el instrumento de la bocana, el fetch del viento que proviene del ángulo comprendido entre 356 ° y 86° (que es de 5 Km), se subestima. En realidad, algunos vientos de estas características (levante o gregal) llegan a tener un

fetch de 10 Km (el doble del empleado para los cálculos). En consecuencia, el oleaje que pueden producir es mayor al estimado mediante este proceso y, por lo tanto, puede que la resuspensión de sedimentos también sea mayor que la que se espera.

La longitud de onda de las olas L se calcula, como ya se ha mencionado, gracias a la formulación lineal específica para las aguas someras:

$$L = Tp\sqrt{g \cdot d} \quad (7)$$

Finalmente, en cuanto a la dirección del oleaje, se supone que tiene la misma dirección que el viento que lo genera.

A continuación se muestra la evolución de la altura significativa, el periodo pico y la longitud de onda durante las dos campañas y para las dos estaciones.

Estación de la bahía

Campaña de verano de 2013

En la Figura 18 se observa que la media de las alturas significantes durante la campaña es de 0.09m, con una dirección media de procedencia de 192º (SSW). Tal y como era de esperar al haber analizado los registros de viento, se da un pico de ola remarcable en esta campaña: a principios de agosto hubo un fuerte viento de levante que destaca al causar alturas de ola de casi 0.4m.

A parte de este temporal destacado para la bahía, aparecen algunos picos de altura de ola de 25cm de altura significativa. Además, se observa en la misma figura que el oleaje, al haber sido calculado a partir de los datos de viento de la estación meteorológica de Alcanar, siguen su mismo patrón. De esta manera, se observa el efecto de las brisas de verano, ya que durante el día las olas son más importantes (igual que el viento de la brisa) mientras que por las noches, tanto las olas como el viento de la brisa son mas suaves.

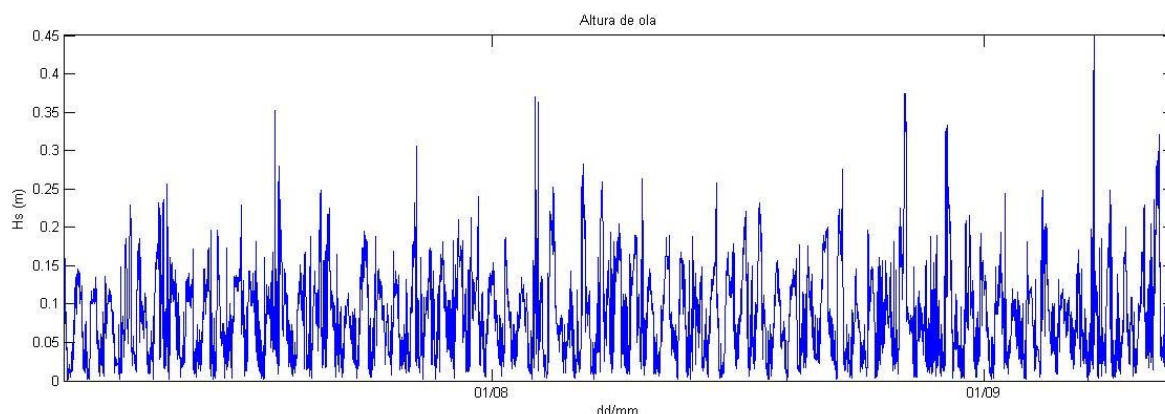


Figura 18: Altura de ola para la estación de la bahía durante la campaña de verano.

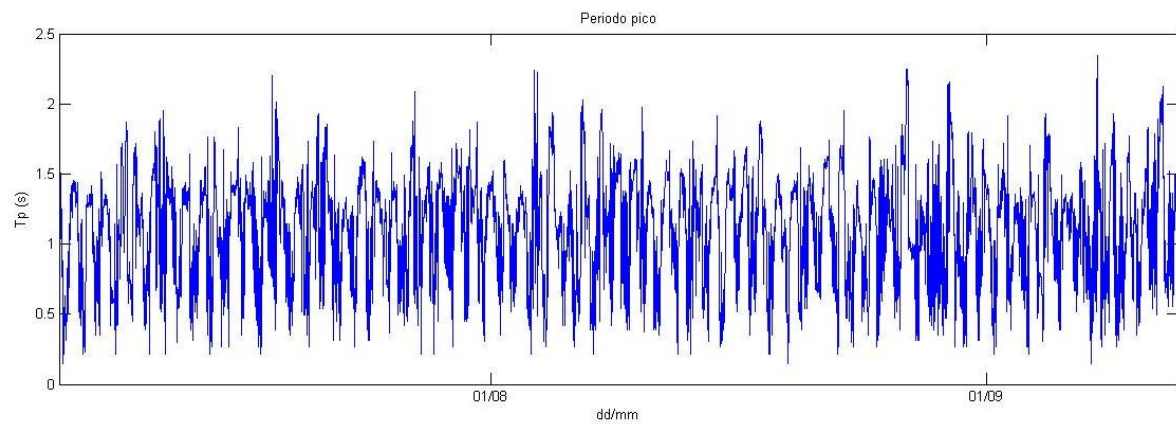


Figura 19: Periodo pico para la estación de la bahía durante la campaña de verano.

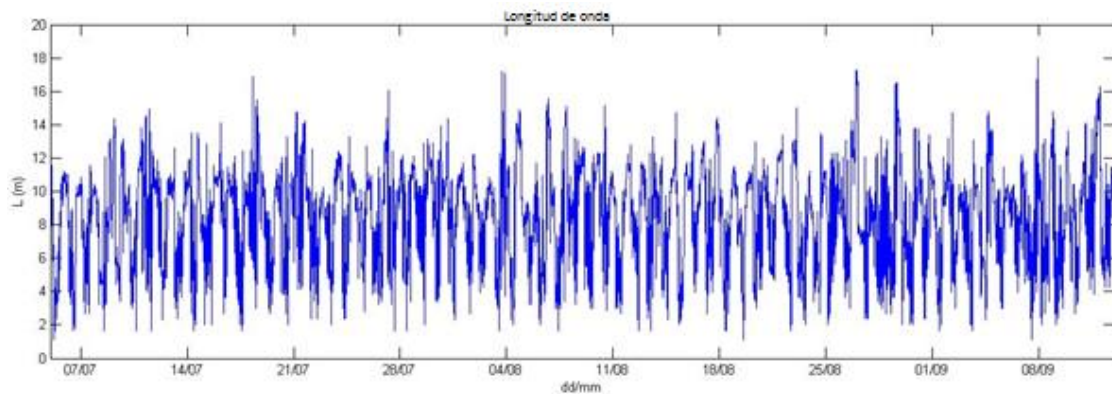


Figura 20: Longitud de onda para la estación de la bahía durante la campaña de verano.

Combinando la altura significativa de ola con la dirección del oleaje y también con el periodo pico, es posible elaborar las rosas de oleaje. En la Figura 21 (arriba) se observa cómo las mayores alturas de oleaje provienen siempre de levante, coincidiendo en el tiempo con las mayores intensidades de viento analizadas. El oleaje de componente noroeste se caracteriza por sus bajos valores, con alturas de ola que mayoritariamente quedan comprendidas alrededor de 10 cm. Finalmente, el oleaje con componente sur se caracteriza por ser de una altura de ola intermedia, de no más de 25 cm.

La diferencia del periodo en función de la dirección es igual de visible en la Figura 21 (abajo), puesto que en la dirección noroeste se registran valores bastante pequeños, y con los mayores periodos con procedencias del este. Finalmente, las olas de dirección sur tienen periodos medios, de aproximadamente 1 s.

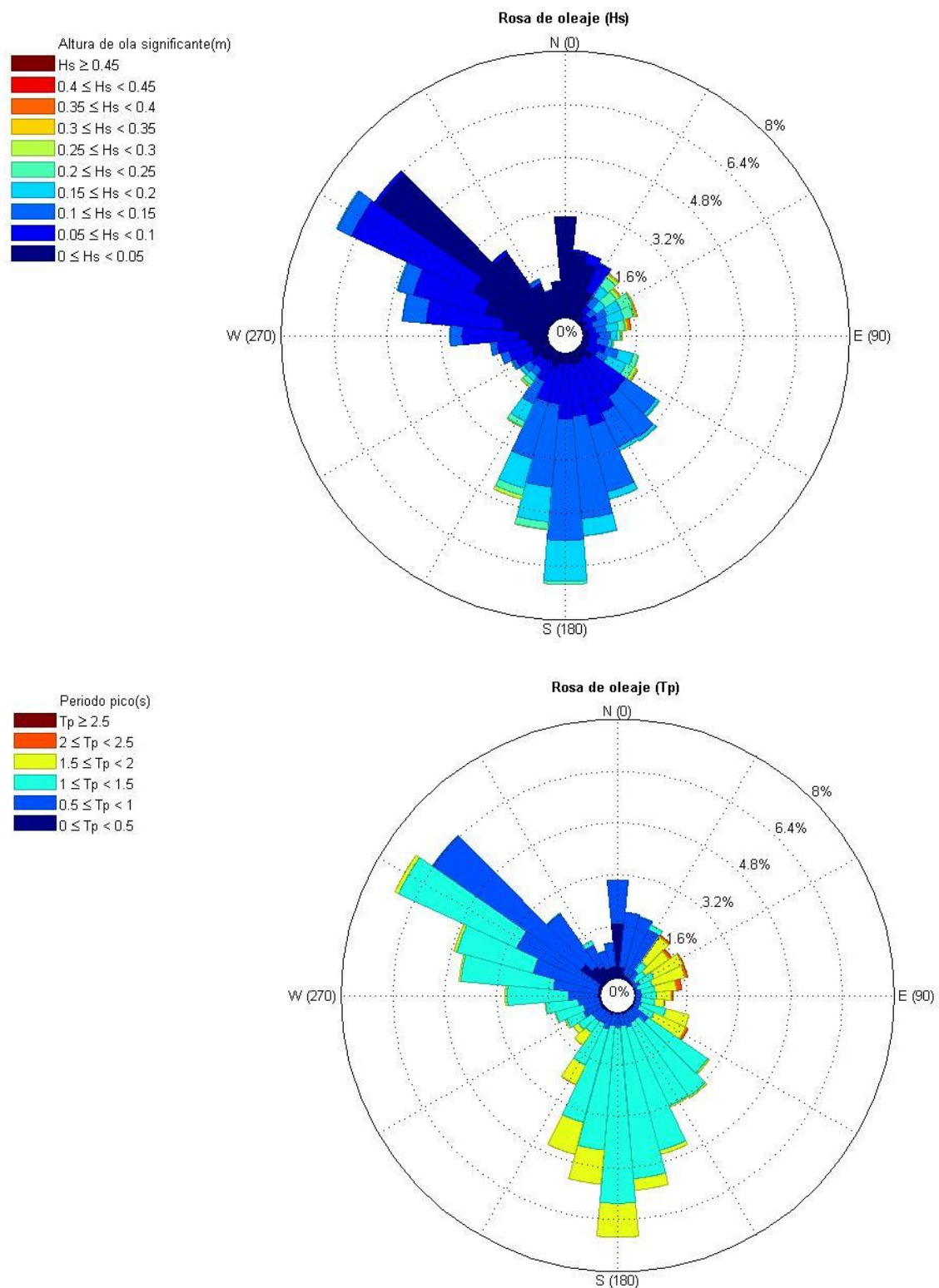


Figura 21: Rosa de oleaje para Hs (arriba) y Tp (abajo) en la estación de la bahía durante la campaña de verano.

Campaña de invierno de 2014

Como se puede ver en la

Figura 22, la media de las alturas significantes durante la campaña de invierno de 2014 en la estación de la bahía es de 0.10 m, aunque hay oleajes más energéticos. De hecho,

la altura máxima de ola significativa calculada fue de 0,61m, la cual se produjo el día 5 de mayo a las 23:50h. Sin embargo, existen otros picos de unos 40cm a lo largo de toda la campaña.

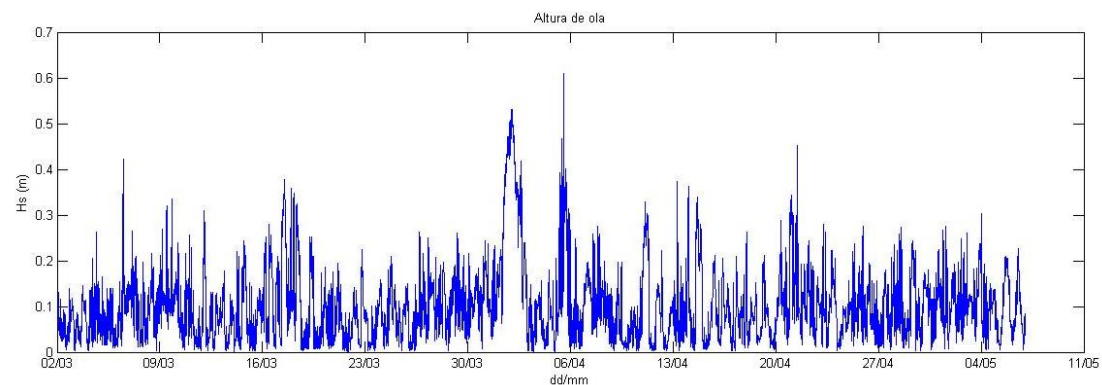


Figura 22: Altura de ola para la estación de la bahía durante la campaña de invierno.

El periodo pico promedio en esta campaña y esta estación es de 1.13 s, aunque comprende valores entre 0.15 s y 2.69s.

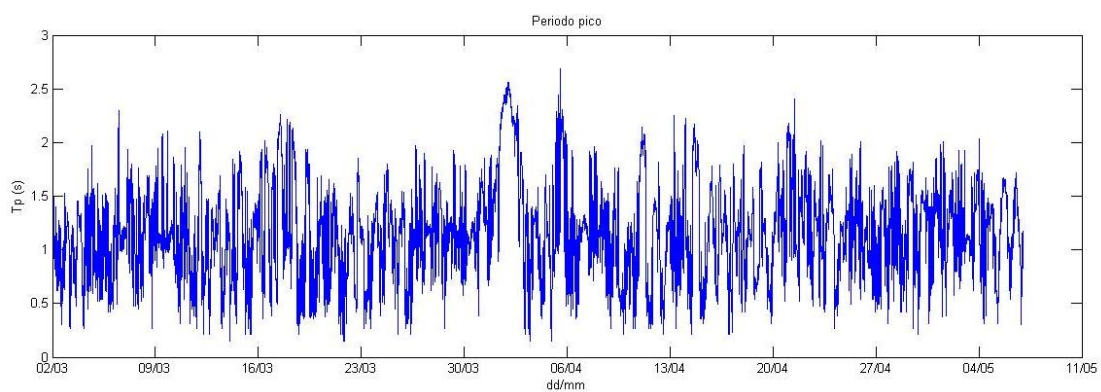


Figura 23: Periodo pico para la estación de la bahía durante la campaña de invierno.

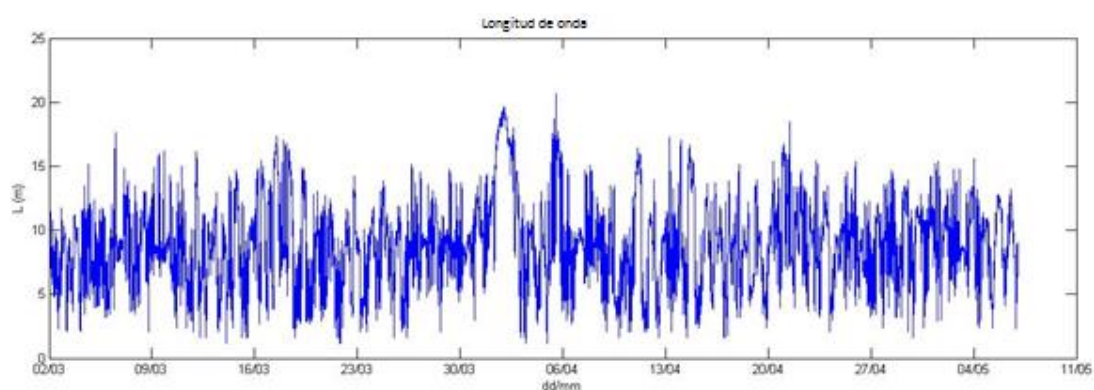


Figura 24: Longitud de onda para la estación de la bahía durante la campaña de invierno.

La dirección de oleaje que tiene lugar con más frecuencia es aquella en la que las olas han sido generadas por un viento que proviene del noroeste (NW o viento de Mestral). De todas formas, no es un oleaje enérgico, dado que pocas veces supera los 20cm de altura significativa. En cambio, el oleaje más enérgico es aquel originado por el viento de

Gregal (NE) y Levante (E). Otra dirección predominante aunque poco energética es aquella provocada por los vientos del sur o Migjorn.

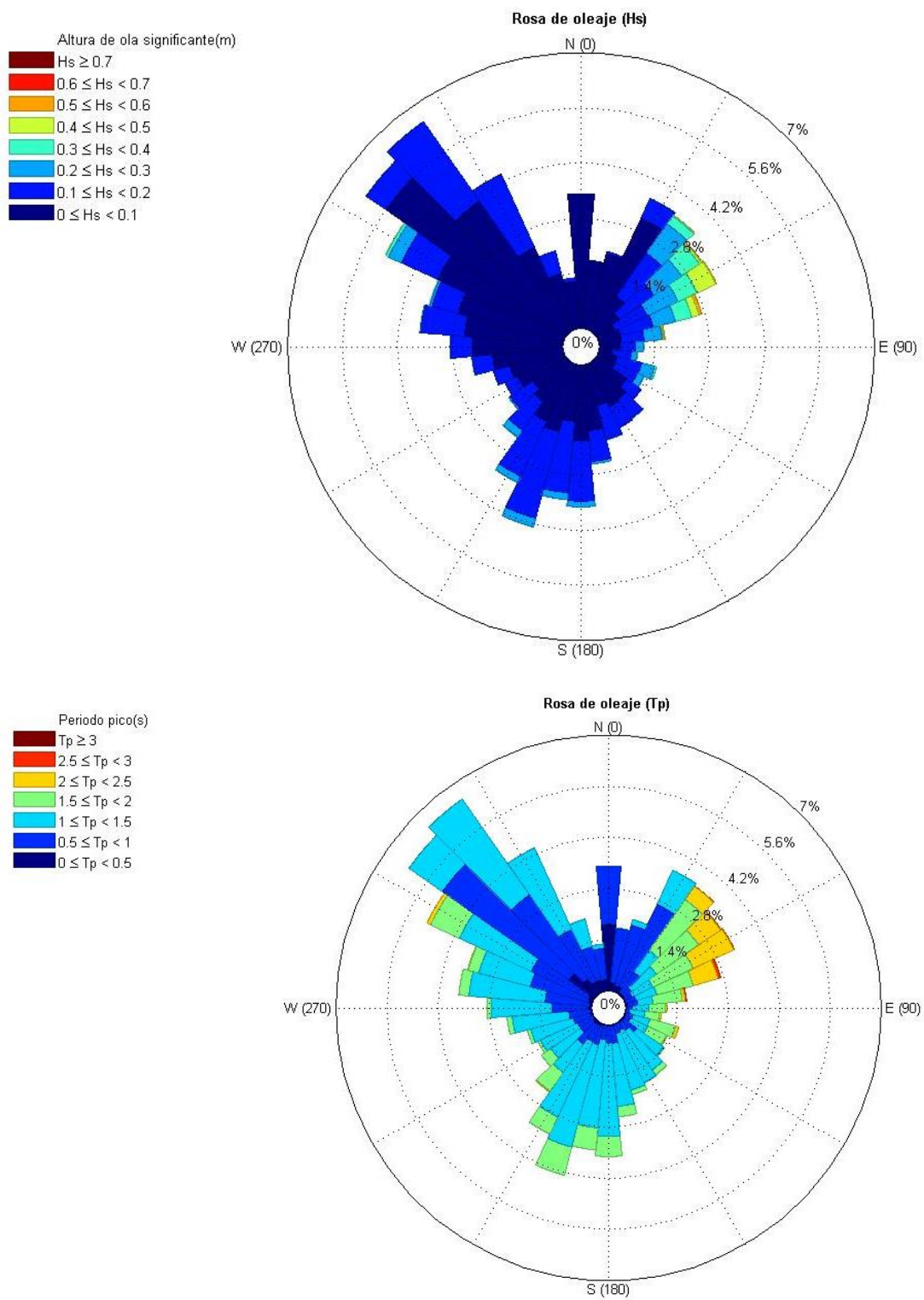


Figura 25: Rosa de oleaje para Hs (arriba) y Tp (abajo) en la estación de la bahía durante la campaña de invierno.

Estación de la bocana

Campaña de verano de 2013

Las diferentes figuras obtenidas para esta estación son muy parecidas a las analizadas en el centro de la bahía durante la misma campaña, pero con algunas variaciones. Analizando la Figura 26, se concluye que en referencia a la altura de ola, en términos generales, los picos registrados fueron cuantitativamente superiores, unos 50cm más. Por una parte, a principios de agosto cuando se dio el pico destacado en la otra estación, se da una altura de ola de unos 0.35m. Por la otra parte, el valor medio de la campaña es de 0.09m. Los demás valores medios de la campaña se pueden encontrar resumidos en la Tabla 6.

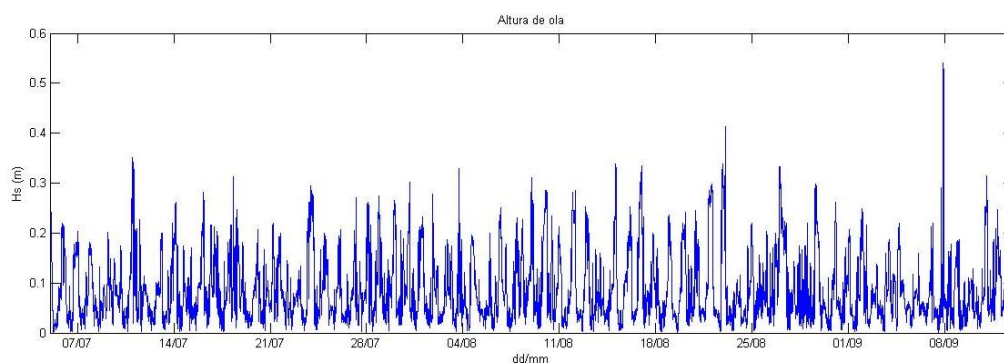


Figura 26: Altura de ola para la estación de la bocana durante la campaña de verano.

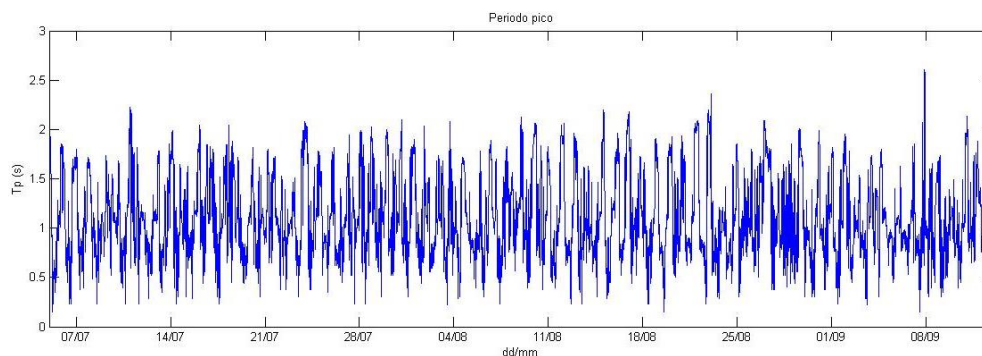


Figura 27: Periodo pico para la estación de la bocana durante la campaña de verano.

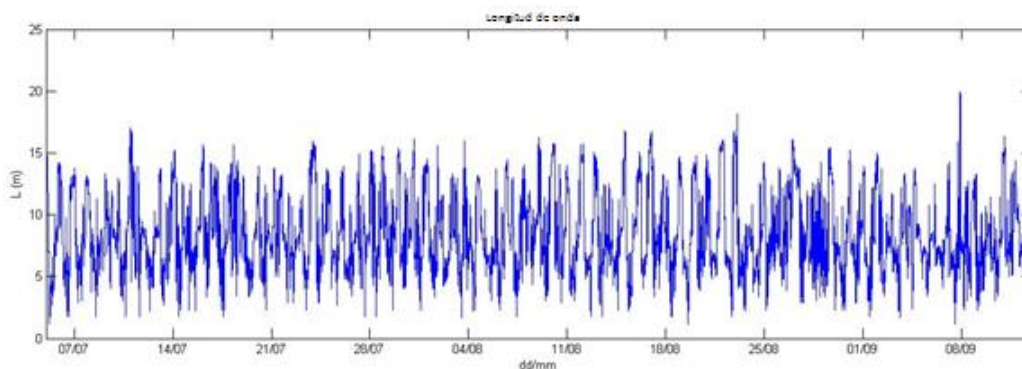


Figura 28: Longitud de onda para la estación de la bocana durante la campaña de verano.

Analizando la rosa del oleaje en la Figura 29 se obtienen exactamente las mismas conclusiones que para la estación que se sitúa en el centro de la bahía: los oleajes más intensos provienen de levante, mientras que el oleaje de componente noroeste presenta unas alturas de ola siempre inferiores a los 10 cm. Los oleajes con origen en el sur son los que dan lugar a unas alturas de ola medias, de unos 20cm. Para la rosa del periodo también se observan unas conclusiones similares a la otra estación.

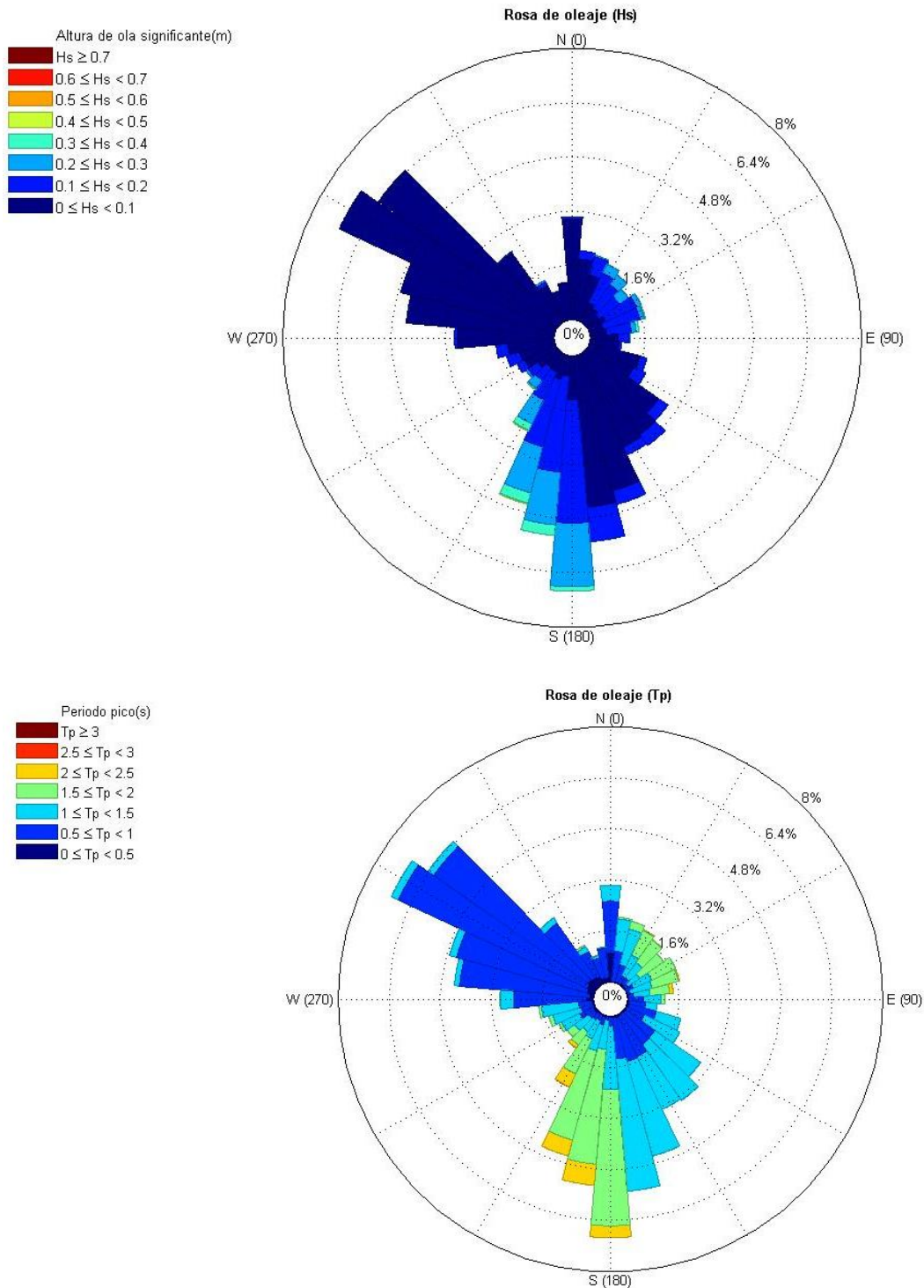


Figura 29: Rosa de oleaje para Hs (arriba) y Tp (abajo) en la estación de la bocana durante la campaña de verano.

Campaña de invierno de 2014

Durante esta campaña, en la estación de la bocana, la altura de ola significativa media es de 0.11m, aunque la máxima alcanza los 0.54m. El periodo pico medio es de 1.19s, aunque toma distintos valores comprendidos entre 0.15s y 2.50s. La dirección media del oleaje es de 193°. A pesar de esto, la dirección que toman las olas más común es del noroeste, y en segunda instancia, del sur, aunque el oleaje más energético no es ninguno de estos dos, sino el que se origina con los vientos de levante (E) y gregal (NE).

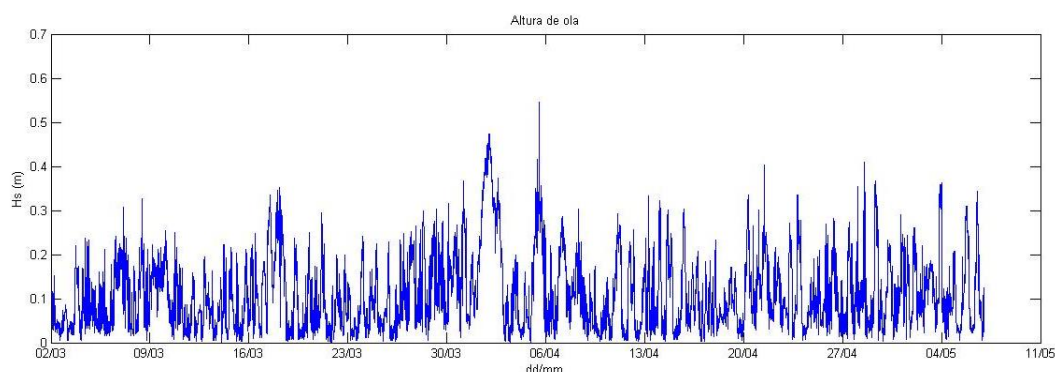


Figura 30: Altura de ola para la estación de la bocana durante la campaña de invierno.

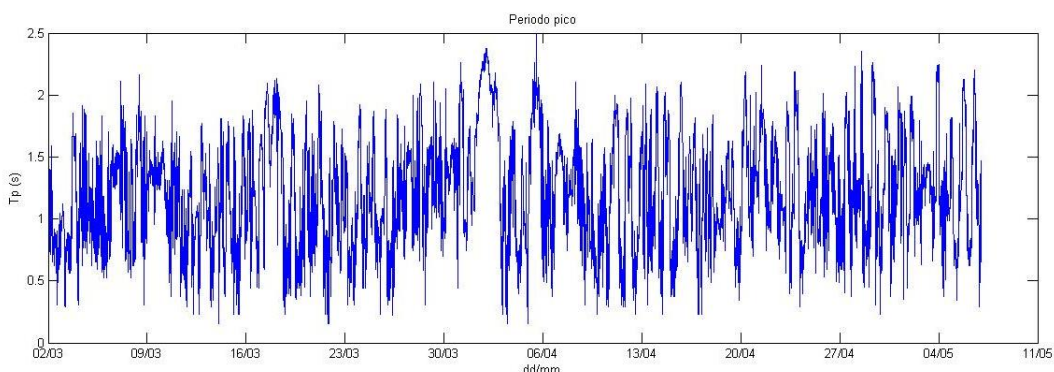


Figura 31: Periodo pico para la estación de la bocana durante la campaña de invierno.

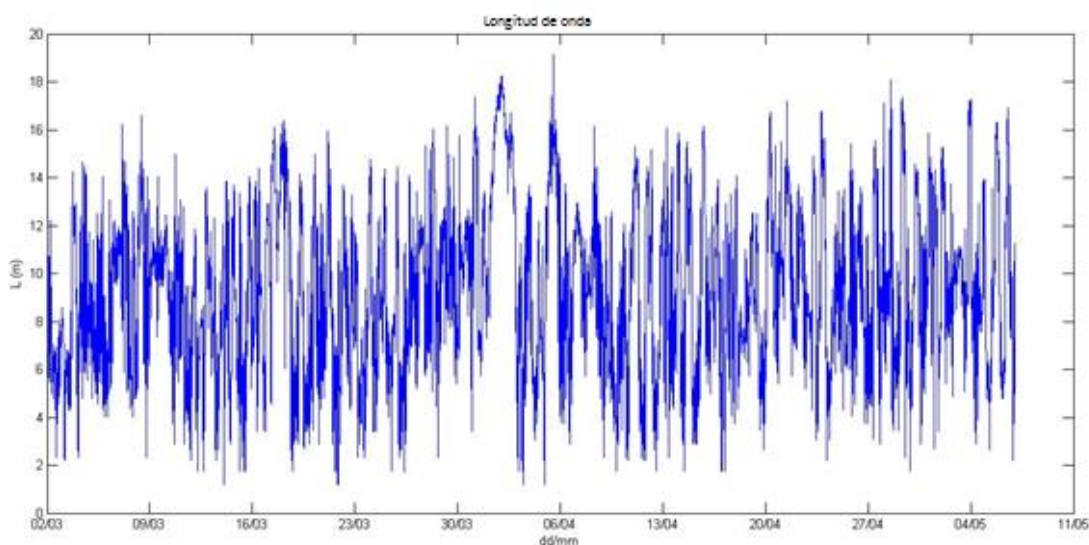


Figura 32: Longitud de onda para la estación de la bocana durante la campaña de invierno.

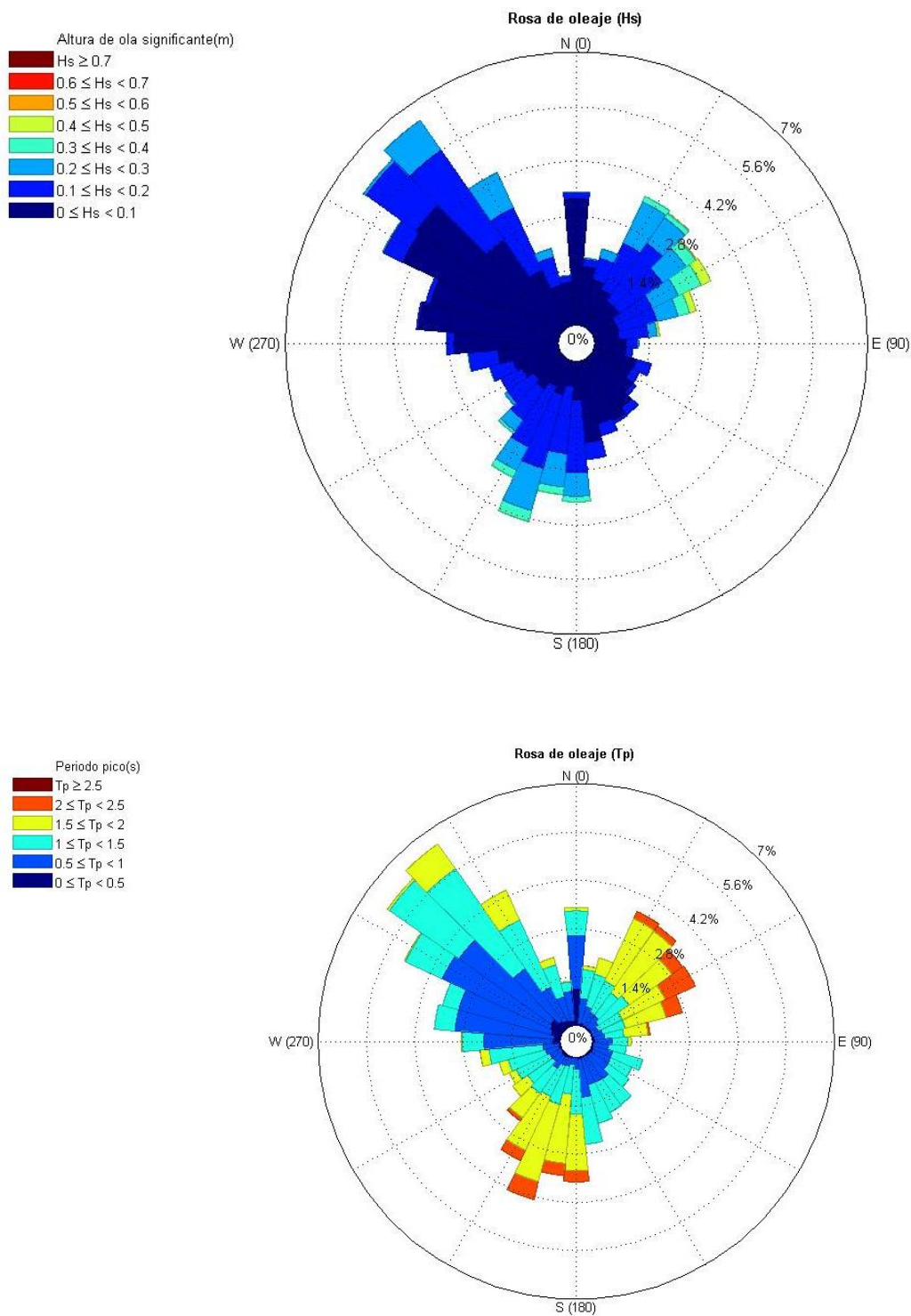


Figura 33: Rosa de oleaje para Hs (arriba) y Tp (abajo) en la estación de la bocana durante la campaña de invierno.

Síntesis

A continuación se procede a resumir los valores calculados más característicos del oleaje (altura significativa y periodo pico) para cada campaña y estación. El objetivo de esto es

poder comparar los resultados de las series registradas según la localización de los aparatos y según la época climatológica.

Tabla 6: Resumen de valores de oleaje: altura (m) y periodo (s).

Estación	Campaña	(Hs) _{media}	(Hs) _{max}	(Tp) _{medio}
Bahía	Verano	0.09m	0.45m	1.10s
	Invierno	0.10m	0.61m	1.14s
Bocana	Verano	0.09m	0.54m	1.11s
	Invierno	0.11m	0.54m	1.19s

Cuando se comparan los datos en función de la campaña, se observa como la altura significativa media es ligeramente más elevada cuando se trata de los registros de invierno. De la misma manera existe esta diferencia en cuanto al periodo pico medio.

Las diferencias entre estaciones son mucho menores. La altura significativa media, dirección media y periodo pico son casi iguales. Tan solo se observa una diferencia más clara entre las alturas significantes máximas. A pesar de ello este dato no es relevante ya que en la estación del centro de la bahía se alcanza una mayor altura de ola durante la campaña de verano mientras en invierno se da en la bocana.

Se observa, además, como en verano se sigue un patrón cíclico con periodicidad de un día, mientras que en invierno hay un gradiente de altura de ola o periodo pico mucho más acusado.

Tiene más sentido encontrar semejanzas entre estaciones, comparando por supuesto épocas iguales. Comparando las mismas figuras de aparatos distintos se observa como la mayoría de los picos se producen los mismos días en ambas estaciones.

5.1.4. Corrientes

Se analizan, seguidamente, los datos referentes a las corrientes tomados a distintas profundidades. De todas formas, se ha decidido trabajar por ahora solamente con el promedio vertical dado que la bahía no tiene grandes profundidades. Así se puede simplificar el análisis sin perder datos relevantes. Se estudian las dos estaciones de medición, situadas en el centro de la bahía y en la bocana. Se explicarán tanto los datos de la campaña de verano del 2013 como la de invierno del 2014. Se incorporan rosas de corrientes para toda esta casuística.

Estación de la bahía

Campaña de verano de 2013

En la Figura 34 se puede observar que durante la campaña de verano, la estación de la bahía no sufre unas velocidades de corriente demasiado dispares. De todas formas, hay un instante de tiempo en el que se llega a alcanzar una velocidad de corriente de unos 50cm/s, convirtiéndose en el valor máximo de la serie de datos. Se observan, además,

otros periodos en que la velocidad de corriente llega a alcanzar 20cm/s. La mayoría de los registros, sin embargo, se sitúan en menos de 10cm/s. Es por este motivo que la media que se desprende de esta serie es de 6,8cm/s.

En cuanto a las direcciones tomadas por la corriente, observando la rosa de corrientes representada en la Figura 35 se deduce que, en los periodos en que la velocidad de la corriente es más intensa, la dirección principal es la NW. A pesar de esto, las direcciones S y NE son predominante para corrientes de menor intensidad. Esto, que también se observa en la serie de direcciones de la Figura 34, es debido a que las corrientes en la bahía deben tener estas direcciones principales a causa de su propia orientación.

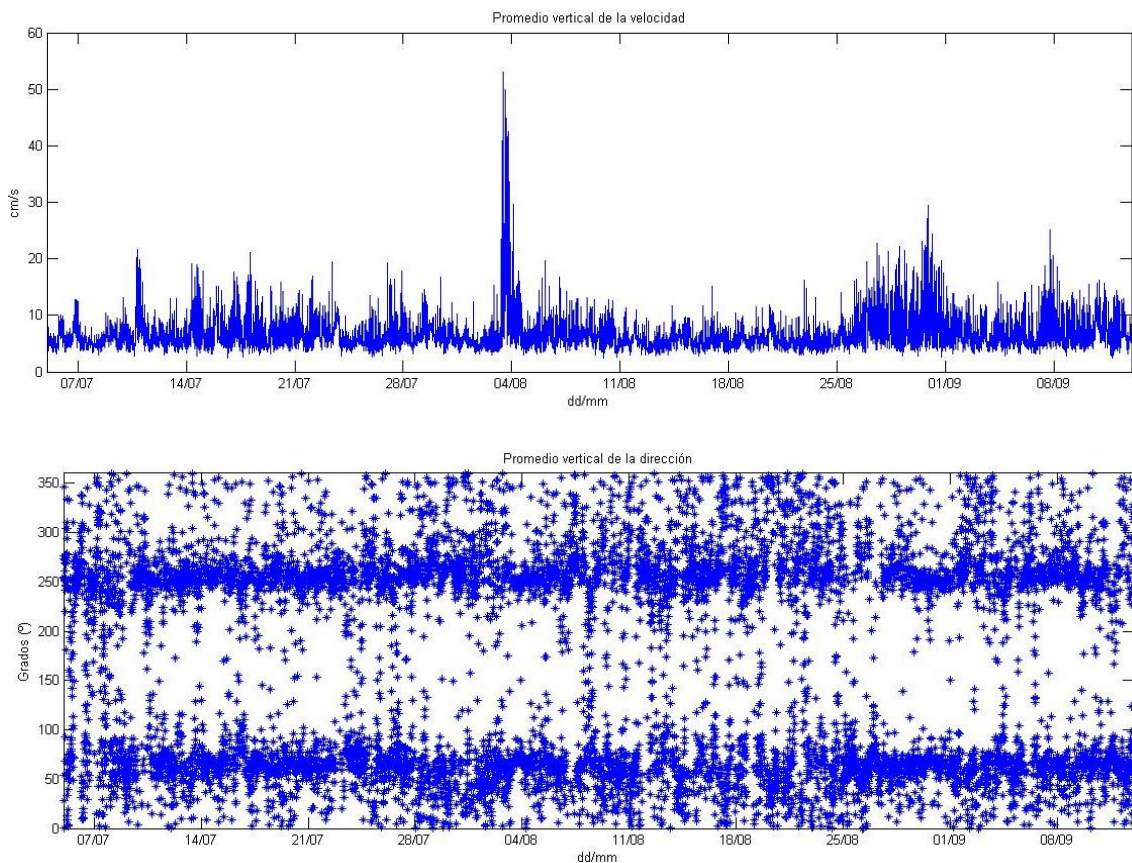


Figura 34: Velocidad y dirección de corriente promediado verticalmente, en la estación de la bahía durante la campaña de verano.

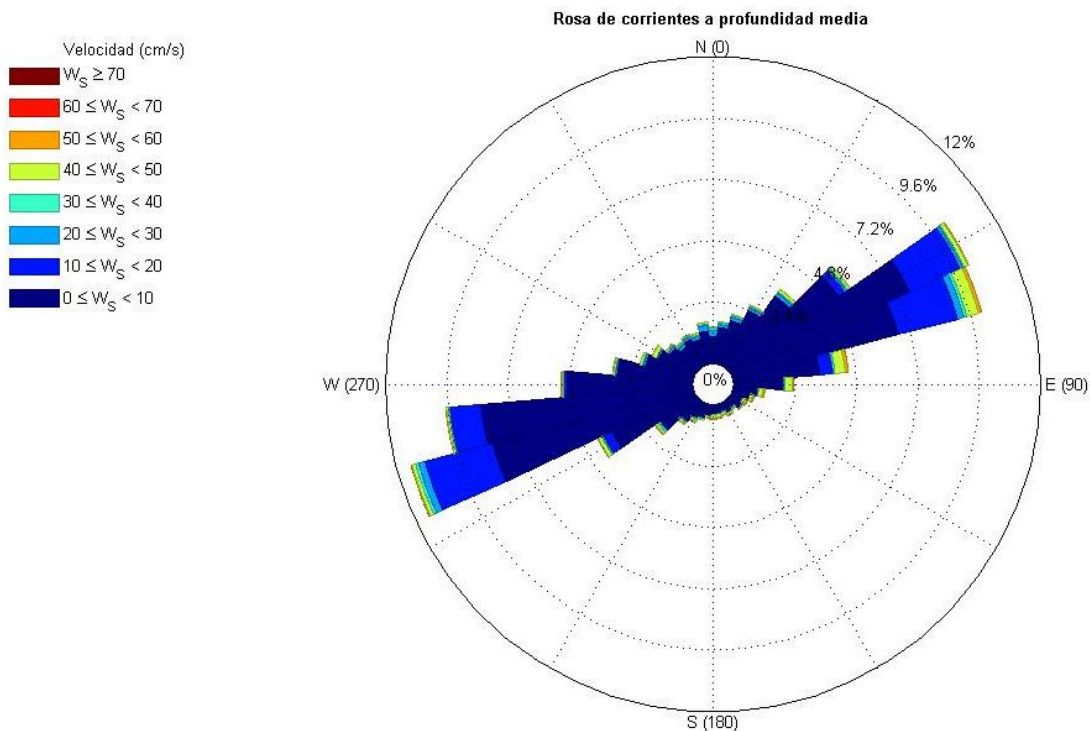


Figura 35: Rosa de corrientes promediadas en la vertical, en la estación de la bahía durante la campaña de verano I.

Campaña de invierno de 2014

Durante la campaña de invierno, los valores de velocidad de corriente son muy variables. Se puede observar esta característica en la Figura 36. Existen dos días en los que se llega a observar una velocidad de corriente de 35cm/s. Sin embargo, se observan muchos periodos en los que la intensidad se halla entre 15 y 25cm/s. Finalmente, también existen periodos de tiempo durante la serie con valores que se mantienen en un rango de 10-15 cm/s. La velocidad media de la corriente en este punto y para esta época es de 6.7cm/s. Es un valor prácticamente igual al que se produce durante la campaña de verano en el mismo punto de medición.

Pasando a analizar las direcciones más frecuentes que toma la corriente, de la rosa de corrientes representada en la Figura 37 se desprende que la dirección principal es la NE seguida de la WSW. La dirección principal de la corriente, que siempre se explica por la orientación de la línea de costa más cercana a la estación, se mantiene igual al estar estudiando el mismo punto.

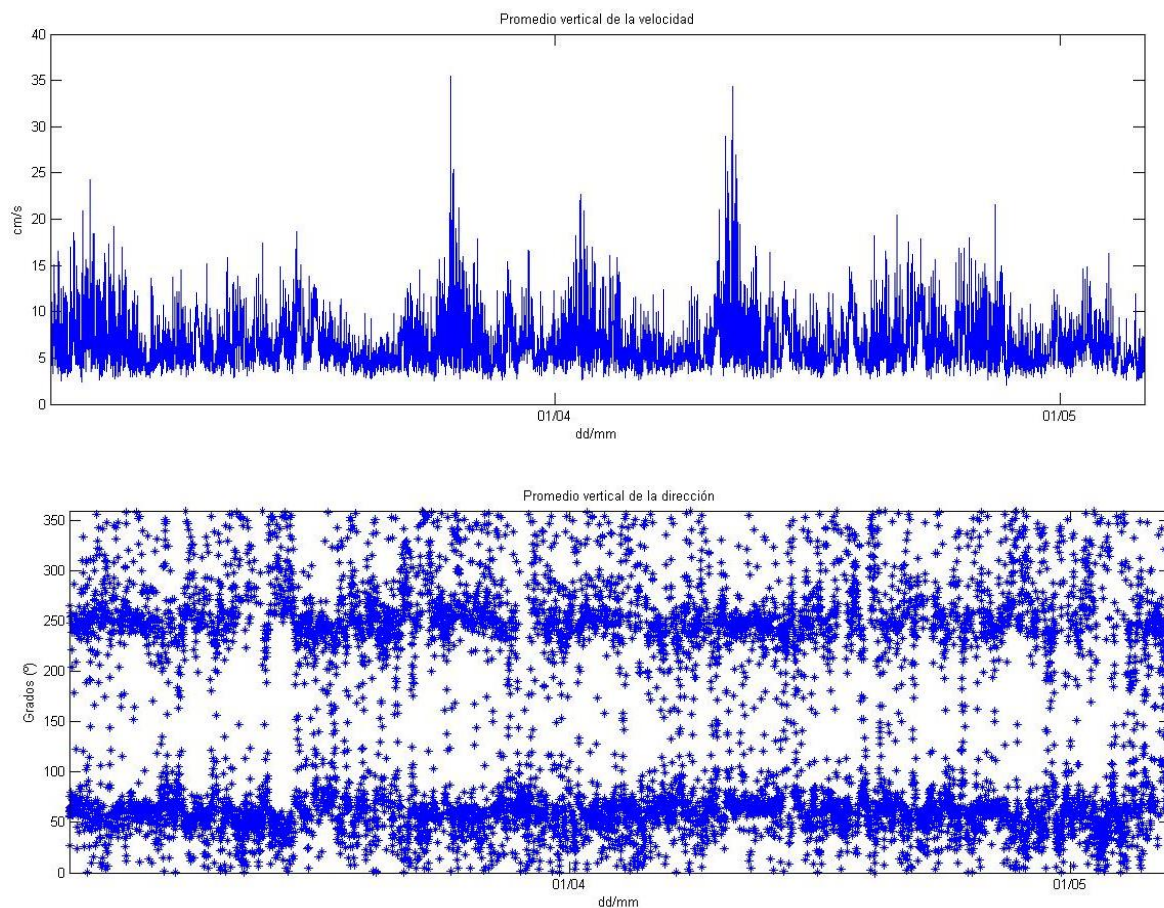


Figura 36: Velocidad y dirección de corriente promediado verticalmente en la estación de la bahía durante la campaña de invierno.

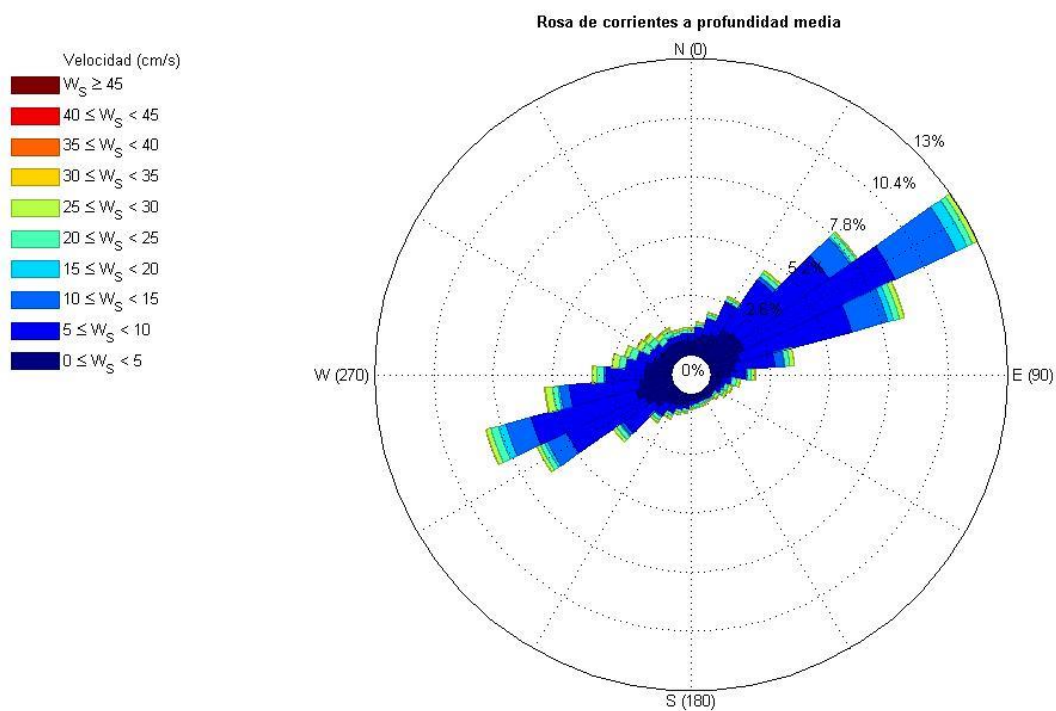


Figura 37: Rosa de corrientes promediadas en la vertical, en la estación de la bahía durante la campaña de invierno.

Estación de la bocana

Campaña de verano de 2013

Tal como se aprecia en la Figura 38, hubo un pico en la velocidad de la corriente el mismo día en que se produjo en el punto de la bahía. Fue de un valor parecido (50 cm/s). Además, aparece un segundo periodo con velocidades de corrientes elevadas, entre 30 y 40 cm/s durante las mismas fechas en que en la estación de la bahía se observan intensidades de entre 10 y 20 cm/s. Durante el resto de la campaña se observan generalmente velocidades menores a 20 cm/s. En este caso, la velocidad media de la corriente es de 8,8 cm/s. Esta cifra está unos 2 puntos por encima de la registrada en la estación de la bahía. El motivo radica en que la bocana está más abierta, y por lo tanto se ve más afectada por las corrientes exteriores a la bahía.

Si ahora se analizan las direcciones más frecuentes de la corriente, es una buena ayuda la rosa de corrientes de la Figura 39. Ésta indica que predominan las direcciones del cuadrante NE y WSW.

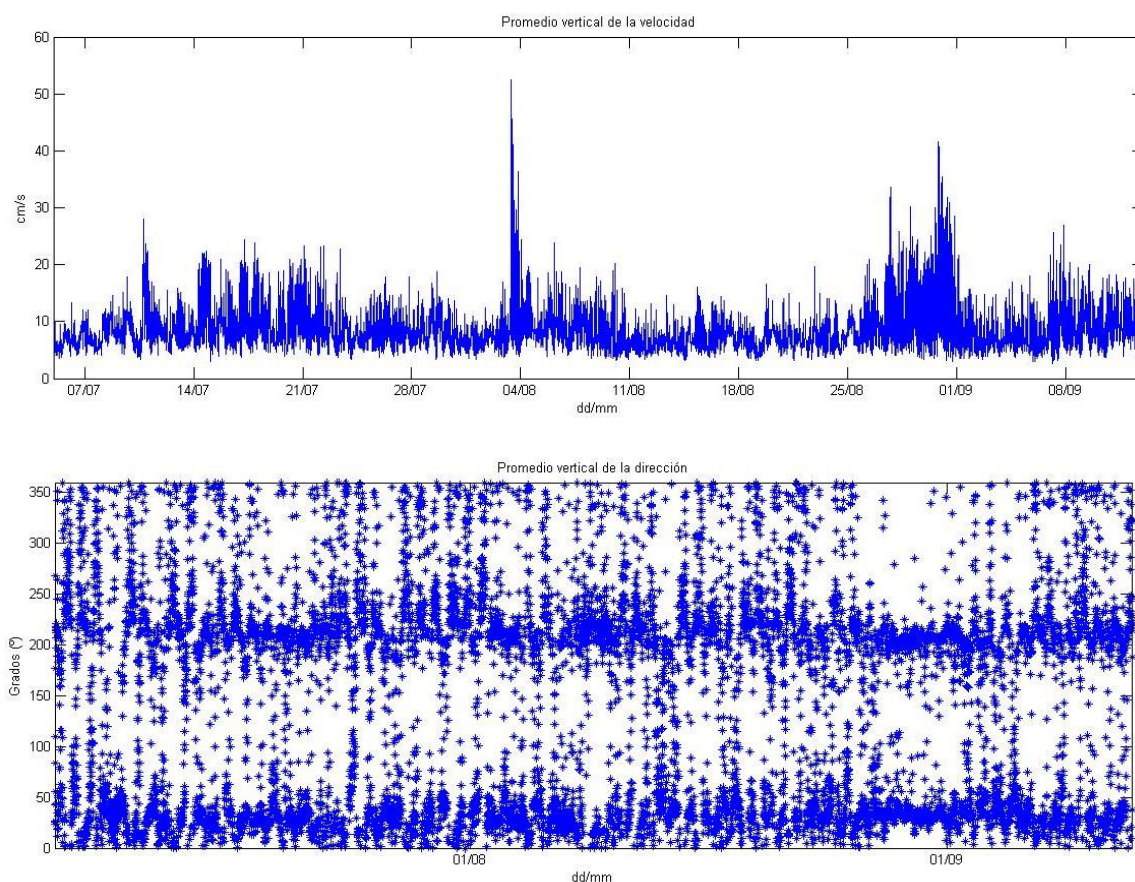


Figura 38: Velocidad y dirección de corriente promediado verticalmente en la estación de la bocana durante la campaña de verano.

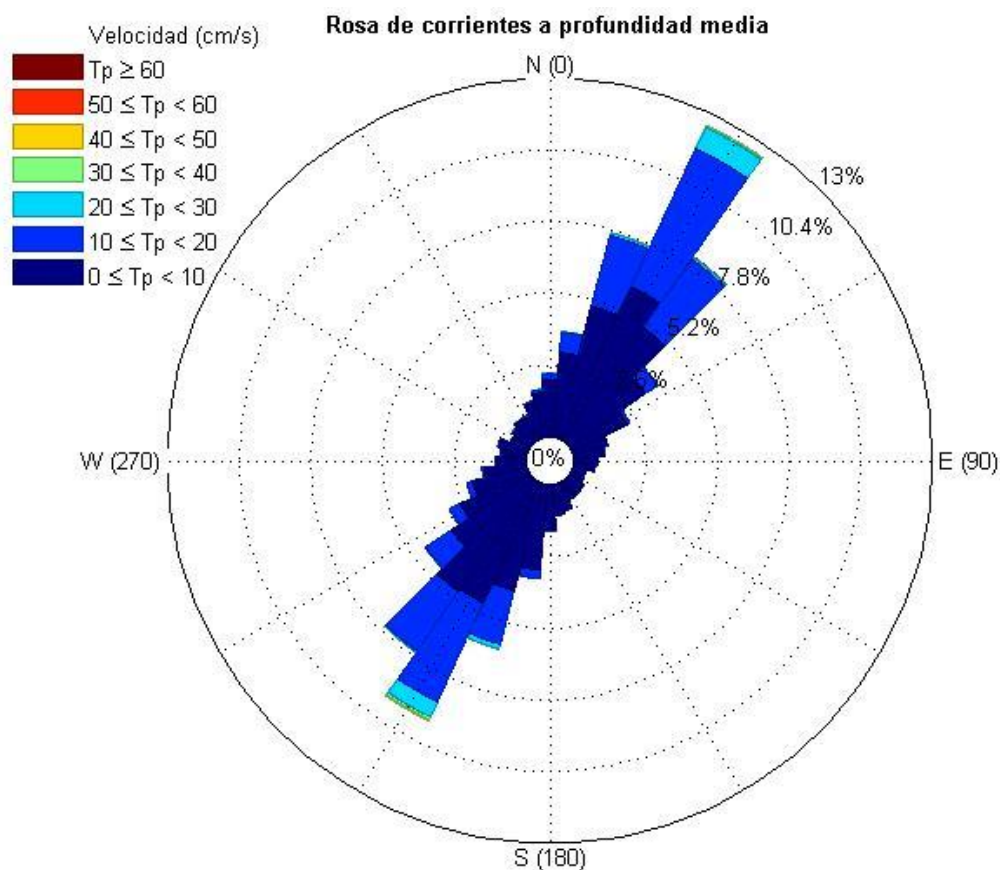


Figura 39: Rosa de corrientes promediadas en la vertical, en la estación de la bocana durante la campaña de verano.

Campaña de invierno de 2014

Según indica la Figura 40, las velocidades registradas por la estación de la bocana durante la campaña de invierno son muy variables. Las velocidades máximas registradas llegan a alcanzar 30 cm/s en algunos instantes puntuales. Sin embargo, por norma general estas velocidades se encuentran por debajo de los 20 cm/s, siendo 9,4cm/s la velocidad media del periodo estudiado.

En cuanto a las direcciones principales que toma la corriente, destaca notablemente la dirección NE, que engloba tanto corrientes de alta intensidad como la mayoría de las de baja intensidad (Figura 41). También aparece como otra opción bastante predominante la SW, de forma similar a la campaña de verano para este mismo punto.

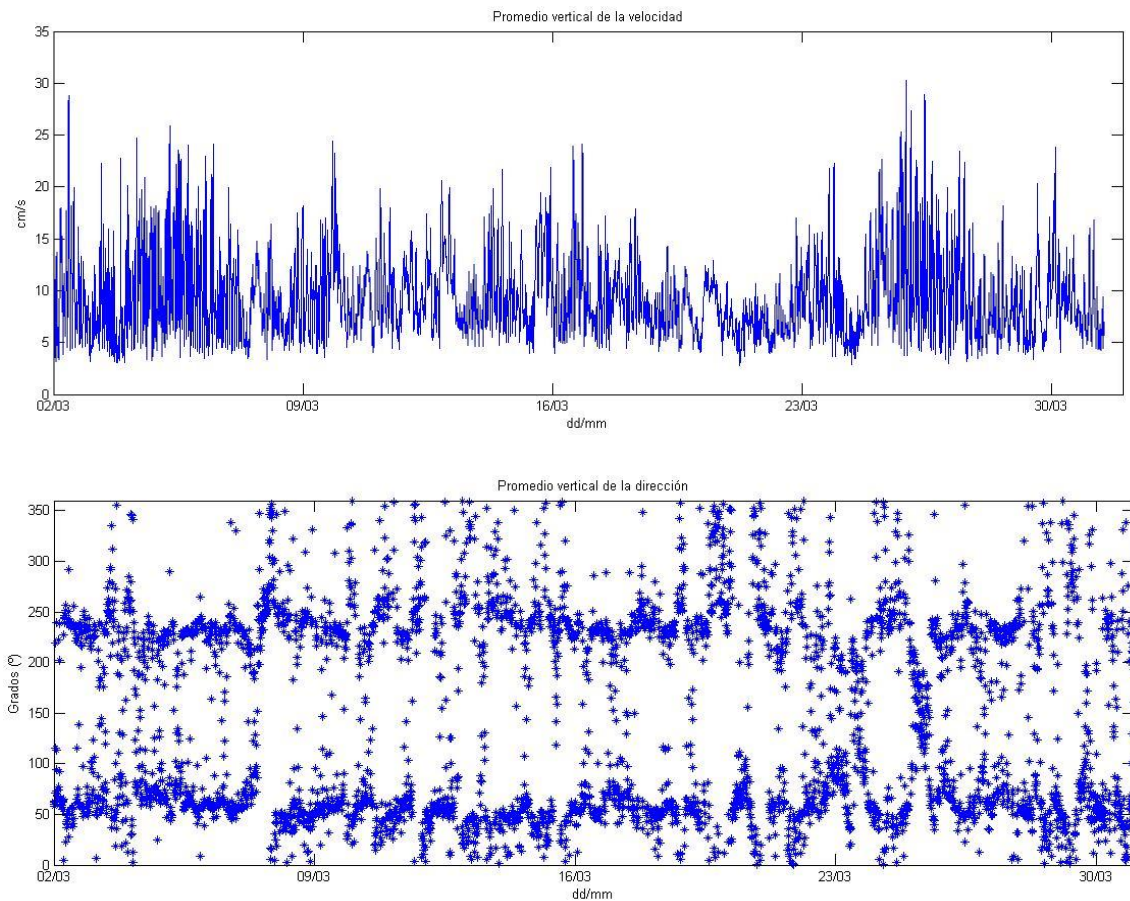


Figura 40: Velocidad y dirección de corriente promediado verticalmente, en la estación de la bocana durante la campaña de invierno.

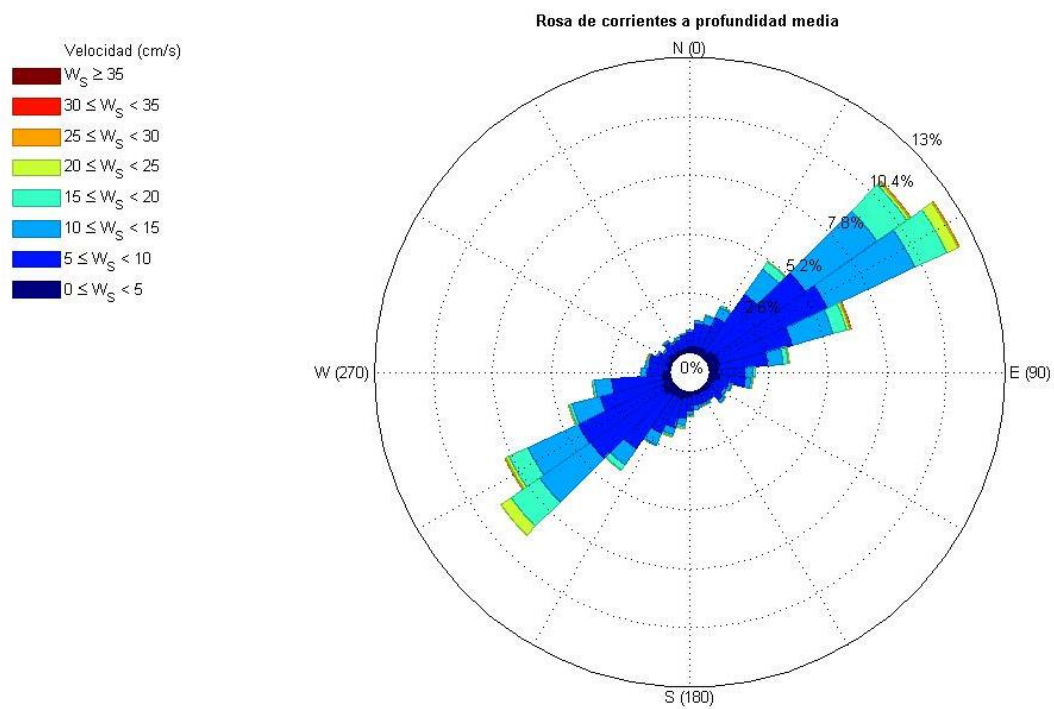


Figura 41: Rosa de corrientes promediado en la vertical, en la estación de la bocana durante la campaña de invierno.

Síntesis

En términos generales, una vez analizadas las corrientes para cada una de las estaciones y campañas, se puede ratificar la existencia de una fuerte corriente en dirección ENE así como una corriente más secundaria que se produce en ocasiones en dirección SWS. Estas corrientes se reproducen en ambos puntos de medida, con más o menos intensidad, pero se observa una clara coincidencia en cuanto a este comportamiento a lo largo de todas las series.

5.1.5. Turbidez

A continuación se representan los valores obtenidos por los OBS de ambas estaciones. El objetivo es ser capaces de localizar aquellos picos e incrementos relativos que pueden significar que se trata de periodos con una turbidez más elevada producida por resuspensión.

Estación de la bahía

Campaña de verano de 2013

La Figura 42 muestra los datos obtenidos del sensor OBS en este punto. Se observan valores más elevados los primeros 15 días y se alcanzan 4 picos de 700, 1400, 800 y 1000 NTU. De todas formas, estas cifras deben considerarse solo como incrementos relativos y nunca como absolutos. Después de estos cuatro picos no se vuelve a dar ninguno parecido en el resto de serie.

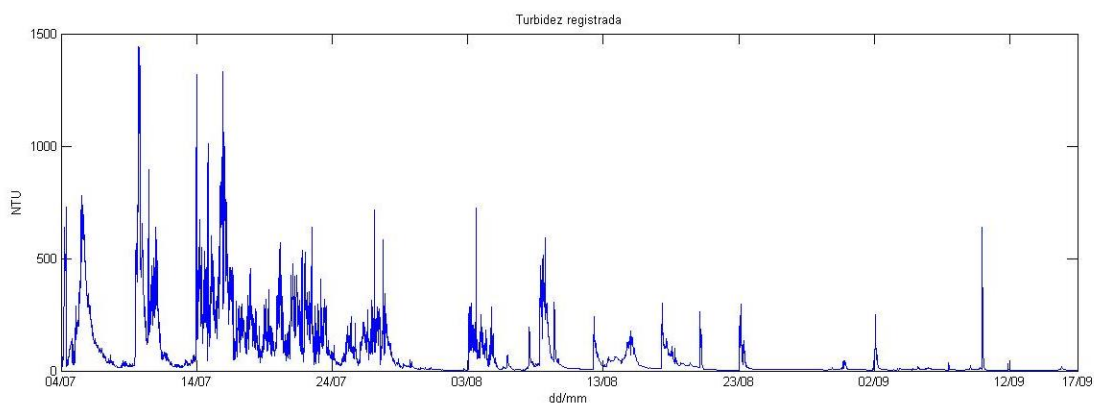


Figura 42: Turbidez (NTU) registrada por el sensor de la bahía durante la campaña de verano.

Campaña de invierno de 2014

La Figura 43 representa la serie de datos obtenidos del sensor OBS situado en la estación del centro de la bahía durante la campaña de invierno de 2014. En ella, se pueden observar diversos picos que se producen durante la última semana de marzo. El valor de estos picos es de 150, 175, 325 y 600 NTU. De todas formas, tal y como se ha comentado en el apartado anterior, lo importante en todo el conjunto de estos datos es siempre el

incremento relativo, nunca el valor absoluto de la turbidez. Además de esto, se produce un pico importante a mediados del mes de Abril, con un valor de 500 NTU.

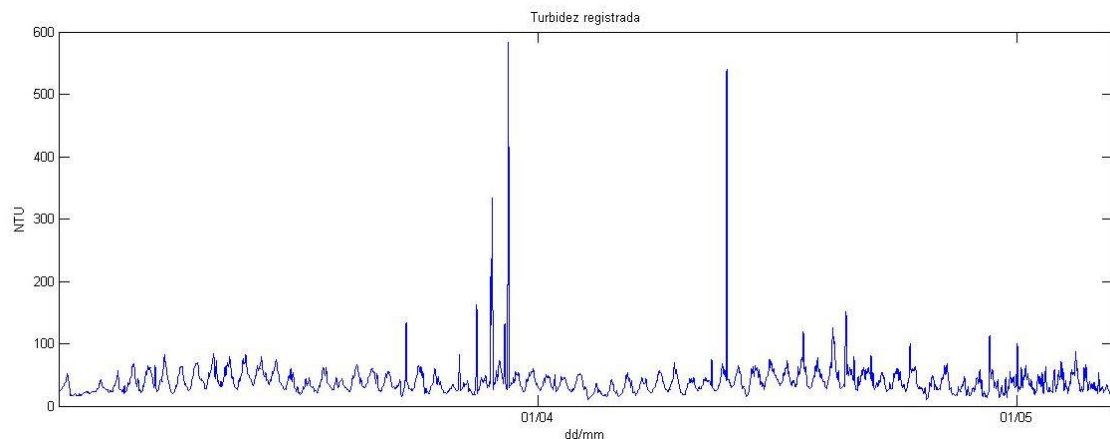


Figura 43: Turbidez (NTU) registrada en el instrumento de la bahía durante la campaña de invierno.

Estación de la bocana

Campaña de verano de 2013

La serie de datos obtenida durante esta campaña muestra un claro incremento continuo de la turbidez, dado que los picos son cada vez más elevados. Hay que tener en cuenta que este incremento puede ser debido a la acumulación de suciedad alrededor de los sensores OBS. Por este motivo, hay que saber diferenciar entre los incrementos que significan mayor turbidez por la resuspensión de sedimentos y este efecto de la suciedad sobre la toma de datos en campo. Los picos que tienen lugar durante esta campaña son de entre 100 y 225 NTU.

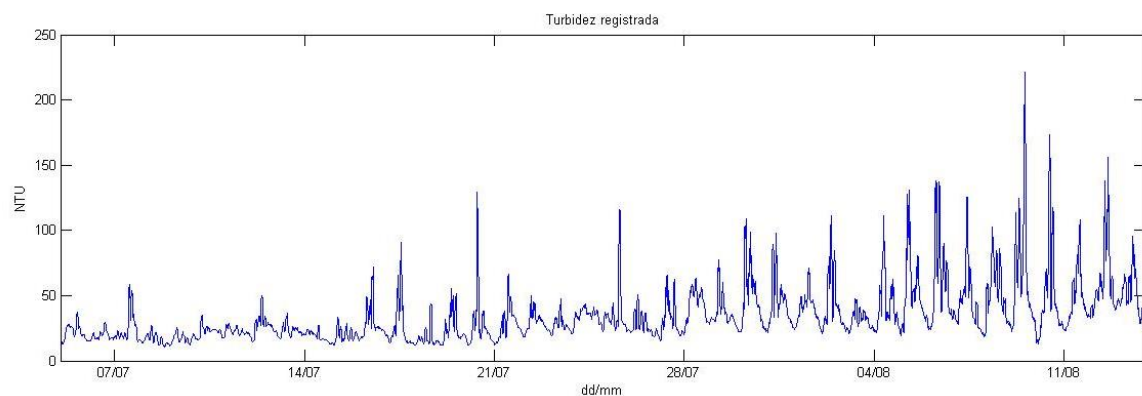


Figura 44: Turbidez (NTU) registrada en el instrumento de la bocana durante la campaña de verano.

Campaña de invierno de 2014

Esta campaña se compone de 3 picos claramente diferenciados en la serie temporal. Para empezar, la primera semana de Marzo tienen lugar dos picos de 100 y 50 NTU cada uno. A continuación, tiene lugar otro pico en cuanto a la turbidez de valor 100 NTU aproximadamente. Finalmente, existe otro pico de casi 300 NTU a finales de Marzo. Sin

embargo, en ese instante fue cuando se estropeó el sensor y por lo tanto esta cifra no es significativa.

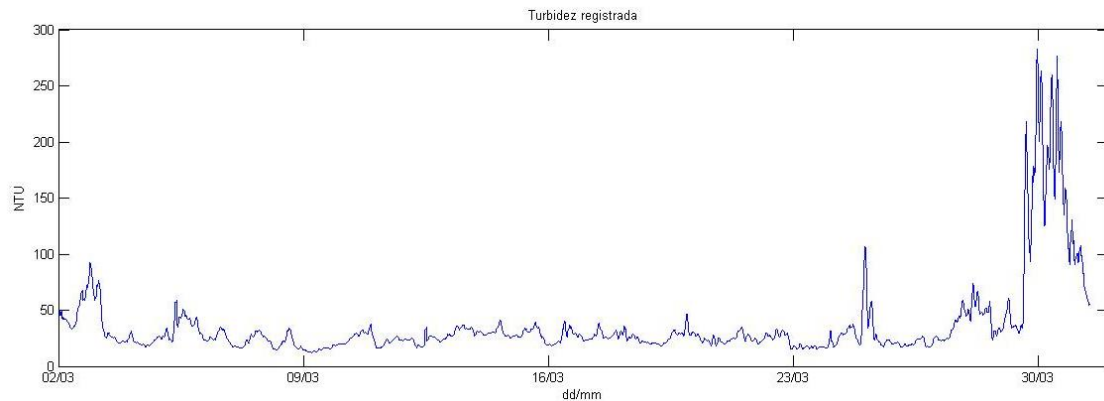


Figura 45: Turbidez (NTU) registrada en el instrumento de la bocana durante la campaña de invierno.

Síntesis

Una vez analizados los datos de turbidez obtenidos por los sensores OBS en cada estación y durante cada campaña, se procede a sintetizar de forma conjunto estos resultados.

Con el fin de comparar las distintas series de datos, se han superpuesto aquellos que pertenecen a la misma campaña pero a distinta estación (Figura 46). Una conclusión que se pueden ver a simple vista es que, durante ambas campañas, la estación de la bahía es la que tiene una turbidez más elevada en términos globales, lo que no impide que en ocasiones sea al contrario.

A partir de estas figuras se tratará de encontrar episodios en los que la turbidez aumente de forma importante para tratar de explicar cada uno de los sucesos seleccionados.

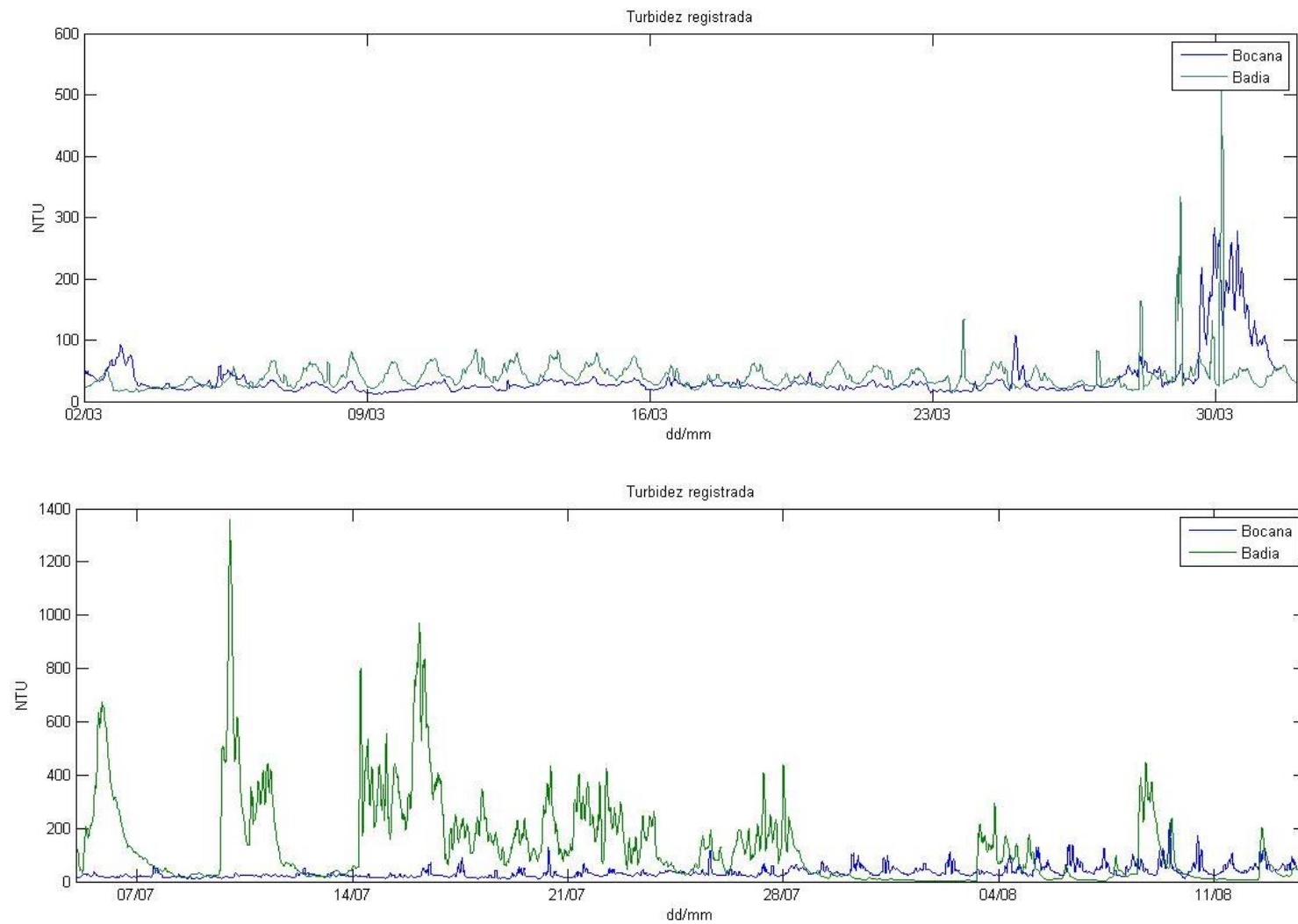


Figura 46: Comparación de la turbidez para ambas campañas y ambas estaciones.

Todavía es posible calcular otras variables que tienen relación con la turbidez. De hecho, se usarán para analizar los datos obtenidos hasta ahora. El primer factor que se estudia es la concentración de sedimentos en suspensión (SSC). Su cálculo se efectúa gracias al estudio de Guillén et al. (2000), donde se propone la relación siguiente:

$$SSC = 1.74 * NTU - 1.32$$

(8)

La concentración de sedimentos en suspensión se expresa en mg/l. Con ello, se han obtenido las siguientes figuras:

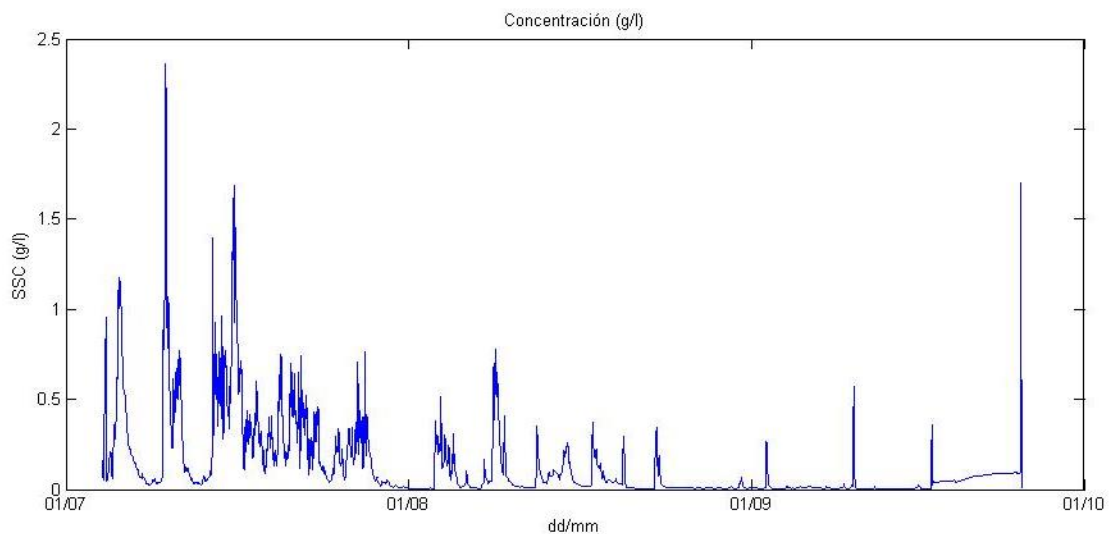


Figura 47: Concentración de sedimentos en suspensión en la estación de la bahía durante la campaña de verano.

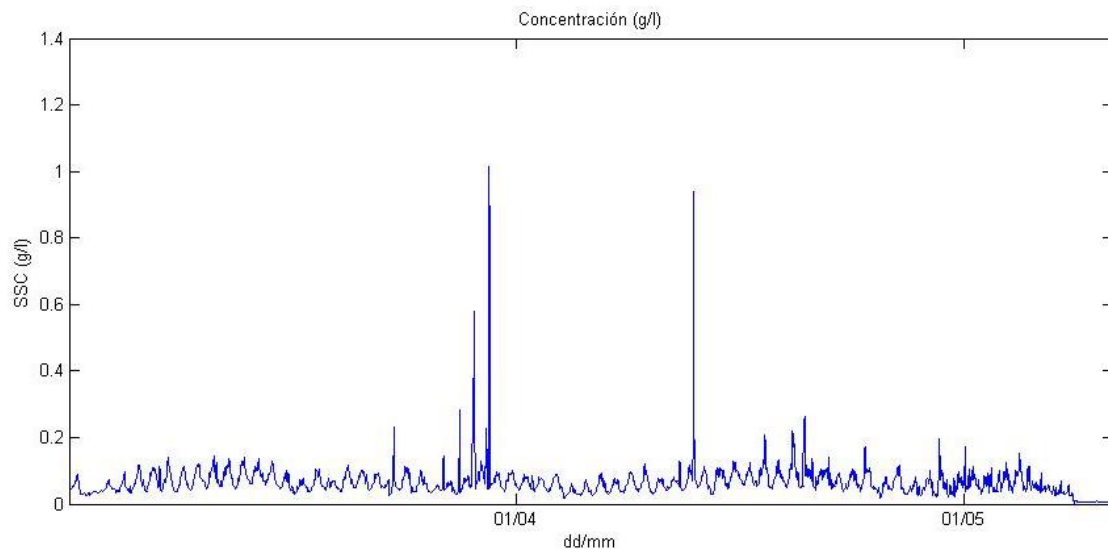


Figura 48: Concentración de sedimentos en suspensión en la estación de la bahía durante la campaña de invierno.

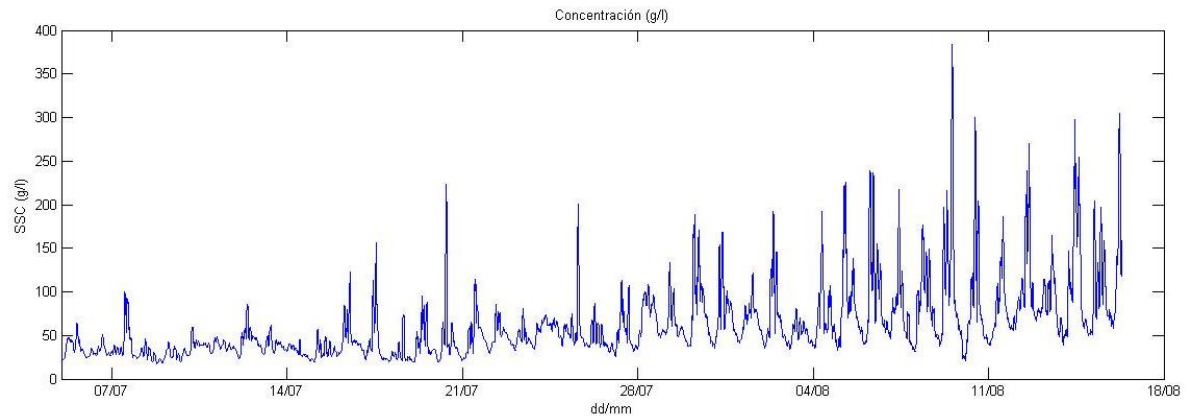


Figura 49: Concentración de sedimentos en suspensión en la estación de la bocana durante la campaña de verano.

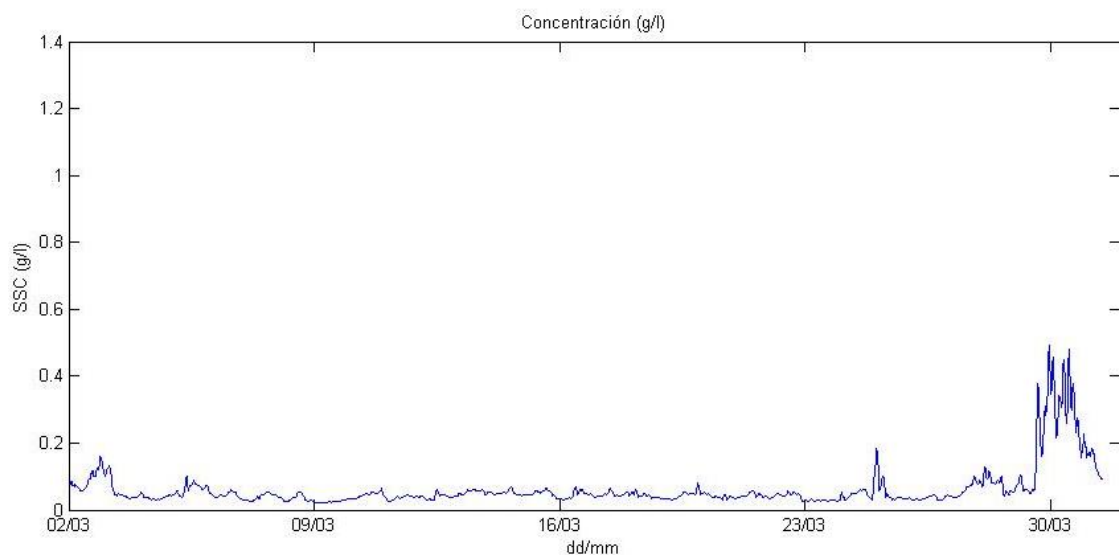


Figura 50: Concentración de sedimentos en suspensión en la estación de la bocana durante la campaña de invierno.

Estas figuras que representan la evolución de la concentración de sedimentos, expresados en g/L, en las dos estaciones y durante ambas campañas, son muy parecidas a las figuras de turbidez en NTU debido a la ecuación que permite calcular la concentración de sedimentos en suspensión. Por este motivo, en el posterior análisis se utilizan tan solo las figuras de turbidez en NTU.

A continuación, es posible calcular el flujo de sedimentos en suspensión con tan solo una simple multiplicación:

$$\vec{q} = SSC * \vec{U}_b \quad (9)$$

La única variable que no ha sido introducida hasta ahora es \vec{U}_b . Hace referencia a la velocidad del fondo (*bottom velocity*), la cual es registrada por los ADCP. El producto obtenido proporciona los siguientes gráficos:

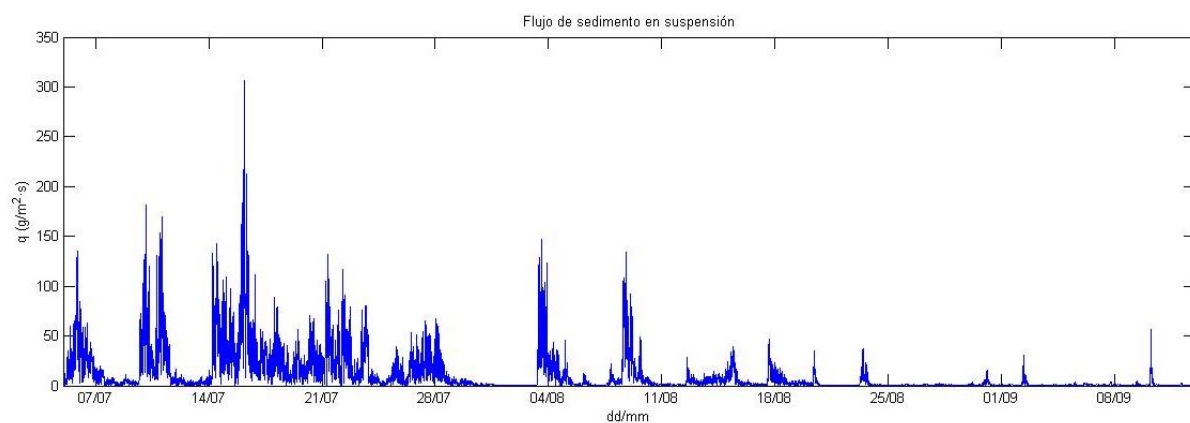


Figura 51: Flujo de sedimento en suspensión en la estación de la bahía durante la campaña de verano.

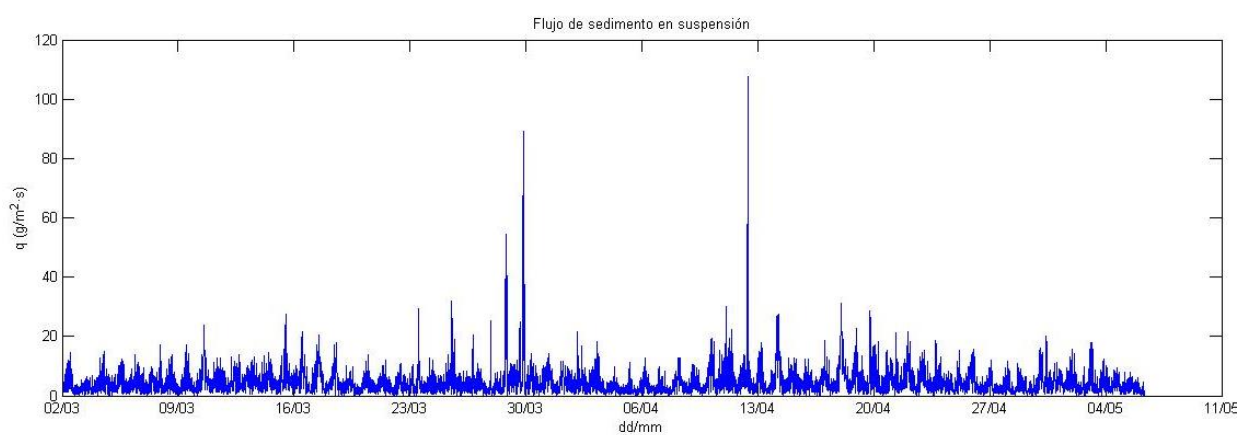


Figura 52: Flujo de sedimento en suspensión en la estación de la bahía durante la campaña de invierno.

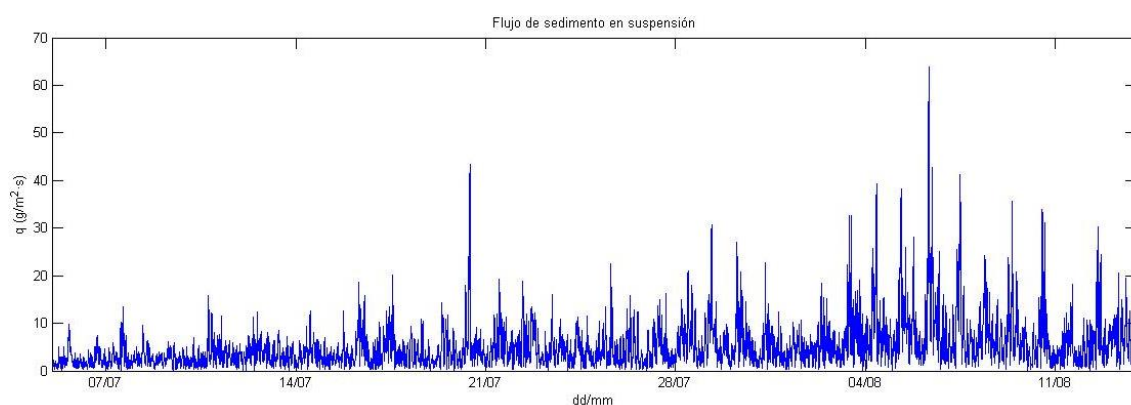


Figura 53: Figura 54: Flujo de sedimento en suspensión en la estación de la bocana durante la campaña de verano.

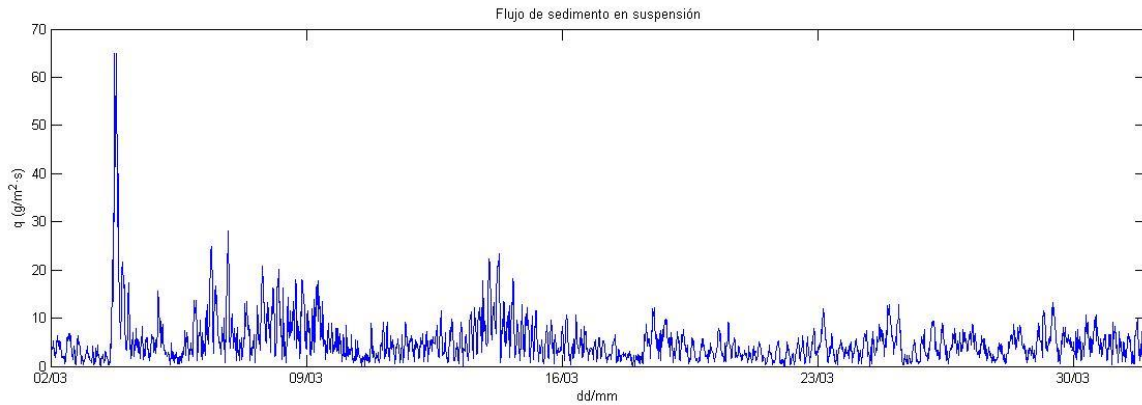


Figura 55: Flujo de sedimento en suspensión en la estación de la bocana durante la campaña de invierno.

5.1.6. Tensiones sobre el fondo

En este capítulo se detalla el procedimiento seguido para calcular las tensiones de corte sobre el fondo asociadas a la corriente y al oleaje. A continuación, es posible encontrar las tensiones generadas bajo la acción combinada de ambos fenómenos hidrodinámicos mediante el modelo propuesto por Soulsby (1993). Los resultados que se plasmarán en gráficos, serán útiles para compararlos con la tensión crítica de Shields.

Tensiones de corte sobre el fondo asociadas a la corriente

Las corrientes que se han analizado anteriormente dan lugar a una velocidad de corriente cerca del fondo que, a su vez, genera una tensión sobre el fondo. El cálculo de ésta es sencillo, tan solo es necesario aplicar la ecuación (10).

$$\tau_c = \rho \cdot C_D \cdot U_c^2 \quad (10)$$

Las distintas variables a las que hace referencia esta ecuación son:

τ_c = Tensión sobre el fondo asociada a la corriente (N/m²)

ρ = Densidad del agua de mar = 1027 Kg/m³

U_c =Velocidad de la corriente cerca del fondo (m/s)

C_D =coeficiente de arrastre

Todas estas variables son conocidas a excepción del coeficiente de arrastre. Este es función de la profundidad total del punto de estudio ($h=6m$), de la longitud de rugosidad total en el fondo (z_0) y de la expresión de la constante de Von Karman ($K=0.4$).

$$C_D = K^2 \left[\ln^2 \left(\frac{z_0 + 0.5h}{z_0} \right) \right]^{-1} \quad (11)$$

La longitud de rugosidad total en el fondo depende del material del que está compuesto el fondo según Soulsby (1983). La tabla que asigna un valor a esta variable según el tipo de suelo sigue a continuación.

Tabla 7: Valor de la longitud de rugosidad total en el fondo según el material (Soulsby 1983)

Material	Z_0
Lodos	0.2 mm
Lodos / Arena	0.7 mm
Limos / Arena	0.05 mm
Arena (sin ripples)	0.4 mm
Arena (con ripples)	6 mm
Arena / Conchas	0.3 mm
Arenas / Gravas	0.3 mm
Lodos / Arenas / Gravas	0.3 mm
Gravas	3 mm

Diversas publicaciones (Palacín et al. 1992 y Martin et al. 2000) han descrito el tipo de sedimento que se encuentra en la bahía dels Alfacs. En conclusión, se considera una gran mayoría de lodos. Por este motivo, se toma un valor de 0.2 mm para la rugosidad total en el fondo.

Con este último dato, ya es posible calcular el coeficiente de arrastre, que resulta ser un valor de 0.00166. Éste, a su vez, puede aproximarse a 0.002, cifra que propone Csanady (1982).

A partir de estos cálculos, se han plasmado en gráficos la evolución de la tensión en el fondo debida a las corrientes, tanto en el centro de la bahía como en la bocana, para los registros tomados en verano y en invierno.

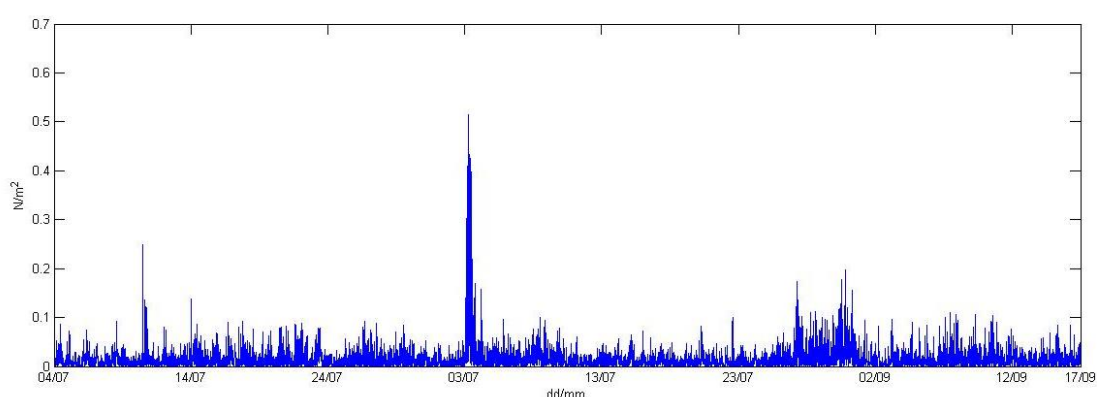


Figura 56: Tensión de corte sobre el fondo asociada a la corriente en la bahía durante el verano.

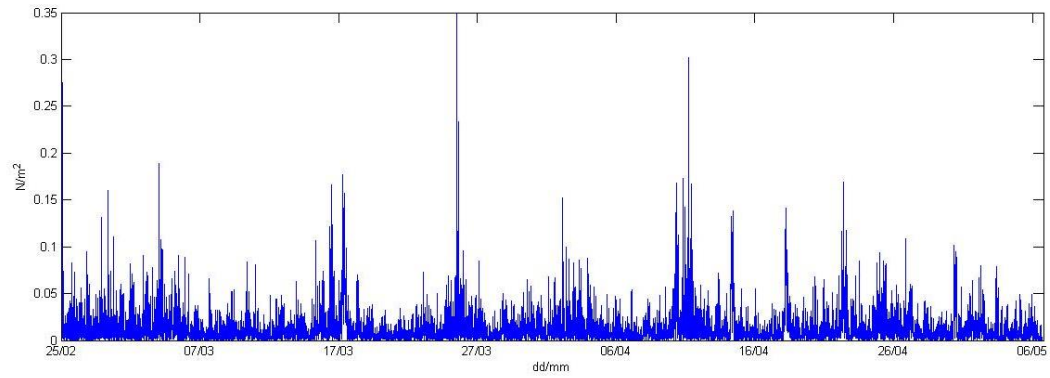


Figura 57: Tensión de corte sobre el fondo asociada a la corriente en la bahía durante el invierno.

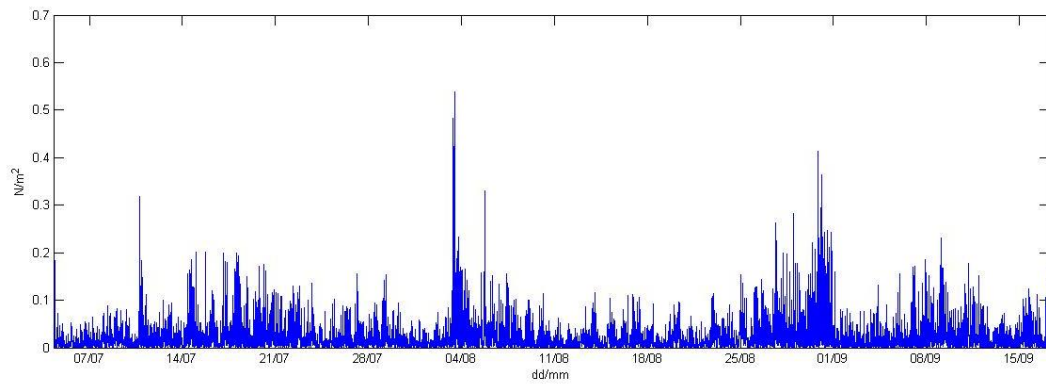


Figura 58: Tensión de corte sobre el fondo asociada a la corriente en la bocana durante el verano.

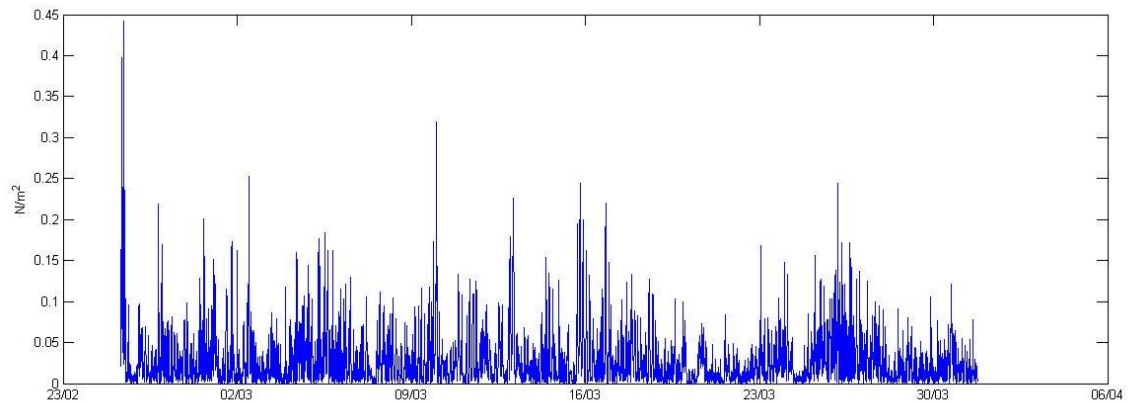


Figura 59: Tensión de corte sobre el fondo asociada a la corriente en la bocana durante el invierno.

Tensiones de corte sobre el fondo asociadas al oleaje

Existe una expresión que permite calcular las tensiones de corte sobre el fondo asociadas únicamente al oleaje, generado al mismo tiempo por el viento.

$$t_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot f_w \cdot u_w^2$$

(12)

Las nuevas variables que aparecen en esta ecuación y, que por lo tanto, son necesarias de explicar, son:

t_w = tensión de corte sobre el fondo asociada al oleaje (N/m^2)

f_w = Coeficiente de fricción del oleaje

u_w = velocidad horizontal máxima de la partícula de agua en el fondo, que se obtiene a partir de la teoría lineal de oleaje.

A su vez, el coeficiente de fricción del oleaje requiere un cálculo previo:

$$f_w = 1.39 \left(\frac{Z_0}{A} \right)^{0.52} \quad (13)$$

Como valor para la rugosidad del fondo se vuelve a tomar $Z_0=0.2mm$, resultado de considerar la existencia de lodos en el fondo (Tabla 7).

Aparece nuevamente una variable hasta ahora desconocida. Se trata de la amplitud de la trayectoria que sigue una partícula de agua, a partir de la predicción que se obtiene de la teoría lineal. Es conocida su expresión:

$$A = \frac{U_w \cdot T_p}{2\pi} \quad (14)$$

Donde T_p es el periodo pico del oleaje (conocido gracias a la ecuación (6) y U_w , incluida también en la (12, que se obtiene de la formulación de teoría lineal.

$$u_w = \frac{\pi H}{T_p} \cdot \frac{1}{\sinh(Kh)} = \frac{\pi H}{T_p} \cdot \frac{1}{\sinh\left(\frac{2\pi}{L}h\right)} \quad (15)$$

De nuevo, algunas variables requieren un breve apunte:

H =altura de ola. Por definición es:

$$H = \frac{H_s}{\sqrt{2}} \quad (16)$$

Donde H_s se había obtenido a partir de la ecuación (5).

Finalmente, en la ecuación (15) solo falta por definir L , que es la longitud de onda obtenida en la ecuación (7).

De esta forma, se pueden generar los gráficos en los que se muestra la evolución de la tensión de corte sobre el fondo asociada al oleaje a lo largo de la campaña de verano y de invierno, tanto en el centro de la bahía como en la bocana.

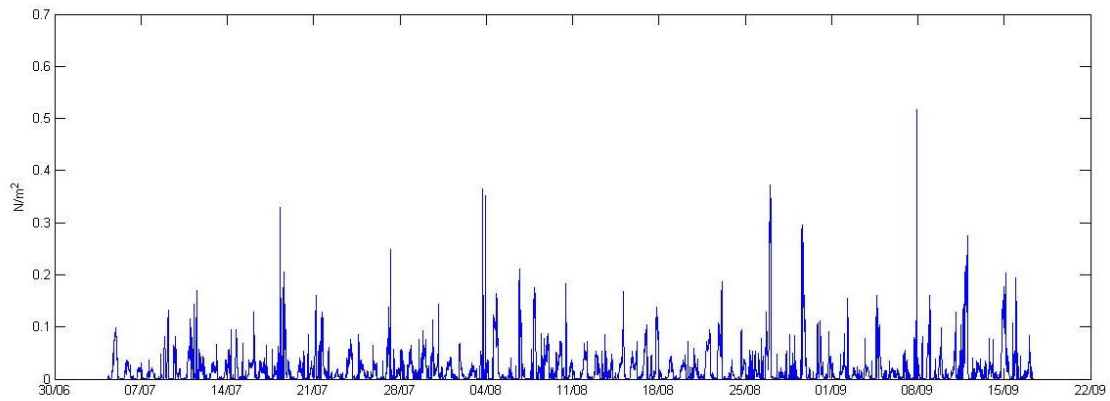


Figura 60: Tensión de corte sobre el fondo asociada al oleaje en la bahía durante el verano.

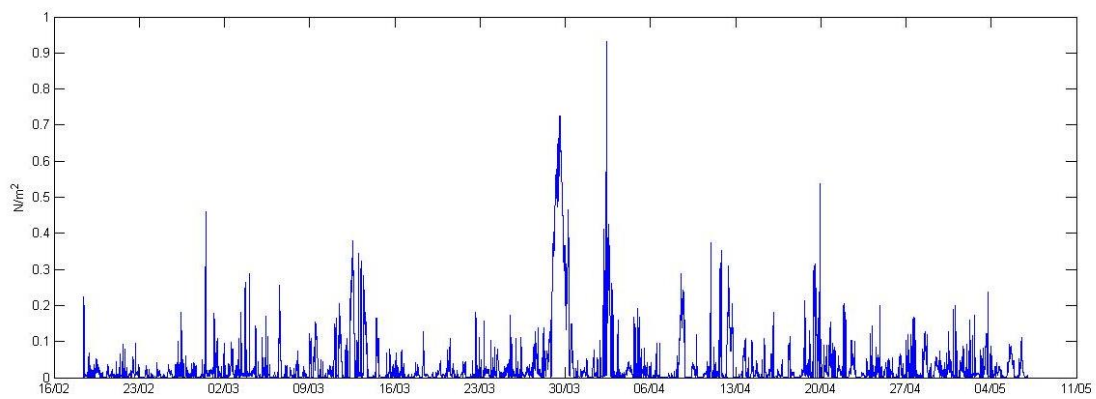


Figura 61: Tensión de corte sobre el fondo asociada al oleaje en la bahía durante el invierno.

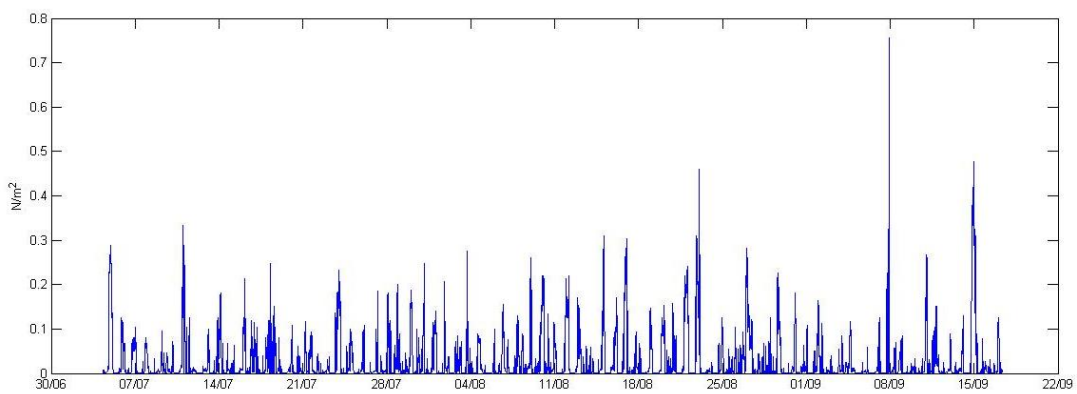


Figura 62: Tensión de corte sobre el fondo asociada al oleaje en la bocana durante el verano,

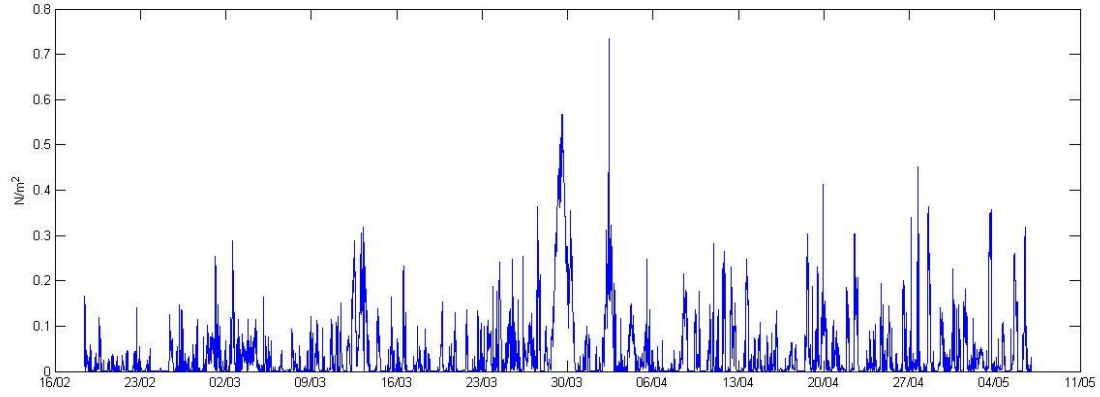


Figura 63: Tensión de corte sobre el fondo asociada al oleaje en la bocana durante el invierno.

Tensiones de corte sobre el fondo combinadas

Para calcular las tensiones de corte sobre el fondo derivadas de los flujos combinados de oleaje y corriente se utiliza el modelo desarrollado por Soulsby (1993).

Soulsby (1993) propone una aproximación algebraica para las tensiones de corte sobre el fondo generadas bajo la acción combinada de olas y corrientes (con una aproximación de $\pm 5\%$ en la mayoría de los casos). Esta aproximación se traduce en el cálculo de la tensión media de fondo bajo la expresión:

$$\tau_m = \tau_c \left[1 + 1.2 \left(\frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3.2} \right] \quad (17)$$

La expresión correspondiente a las tensiones de corte sobre el fondo máximas τ_{max} viene dada por la suma vectorial de τ_m y τ_w :

$$\tau_{max} = [(\tau_m + \tau_w \cos \Phi)^2 + (\tau_w \sin \Phi)^2]^{1/2} \quad (18)$$

Dónde, evidentemente, Φ es el ángulo entre la dirección de la corriente y la dirección de propagación del oleaje.

Este último cálculo de la tensión de corte máximas sobre el fondo es indispensable ya que τ_m no es la responsable de la resuspensión de los sedimentos del fondo, sino τ_{max} , cuyo resultado se muestra en las siguientes figuras.

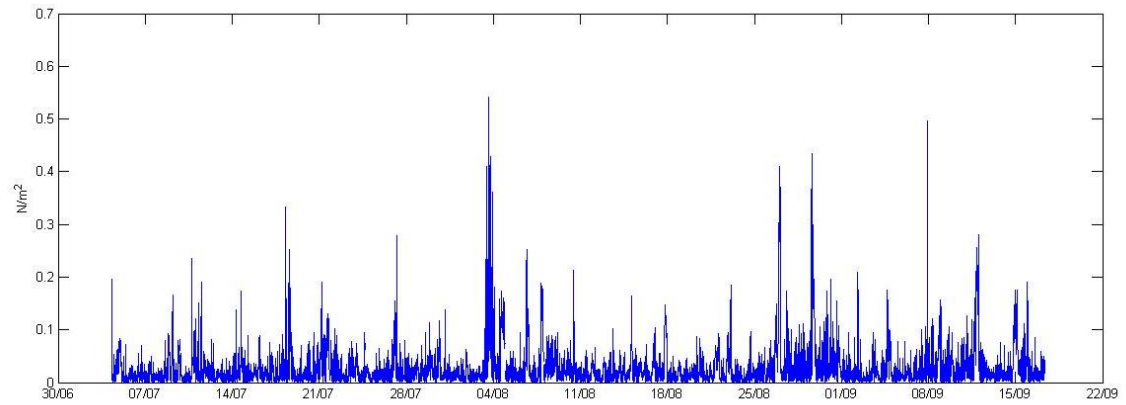


Figura 64: Tensión de corte máxima sobre el fondo en la bahía durante el verano.

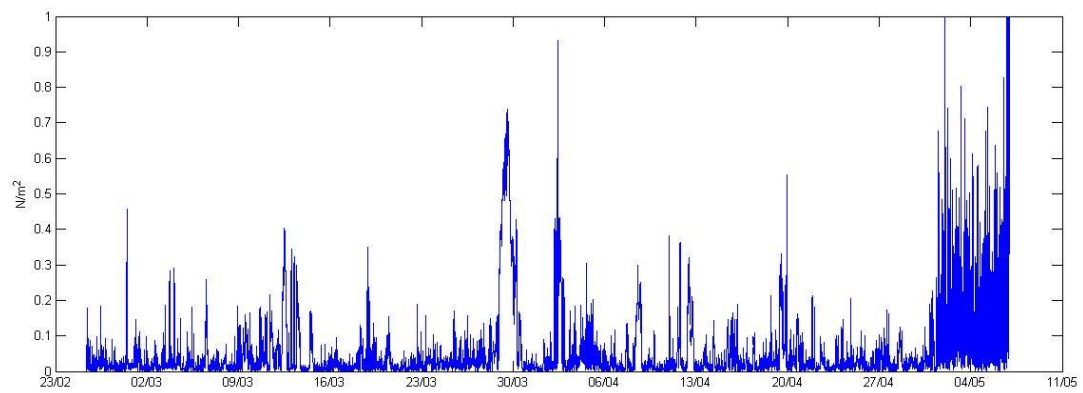


Figura 65: Tensión de corte máxima sobre el fondo en la bahía durante el invierno.

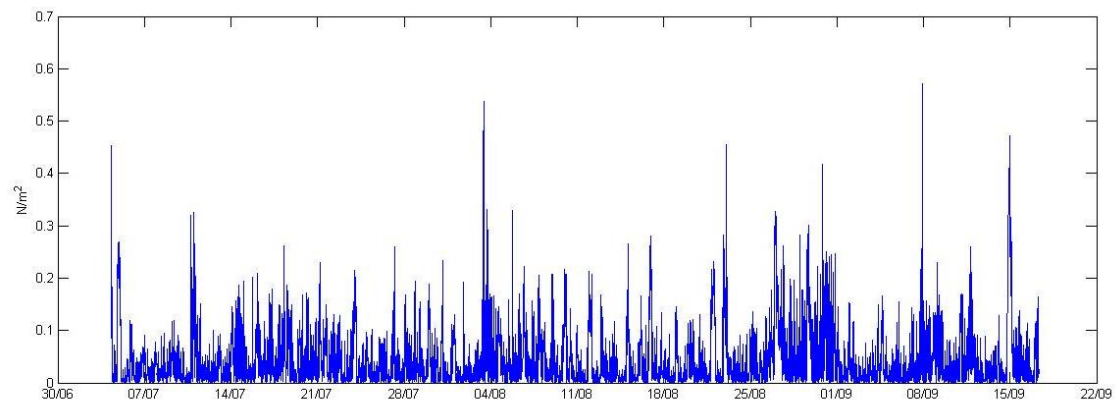


Figura 66: Tensión de corte máxima sobre el fondo en la bocana durante el verano.

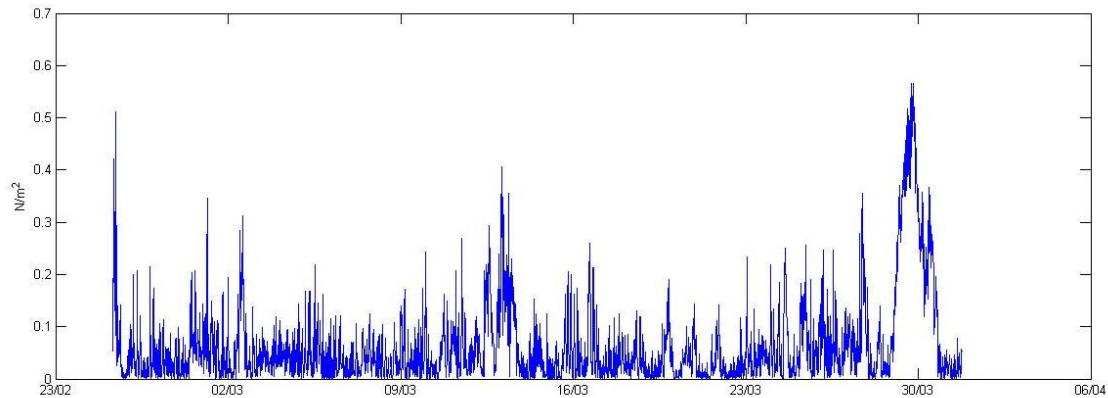


Figura 67: Tensión de corte máxima sobre el fondo en la bocana durante el invierno.

Tensión de corte crítica de Shields

El objetivo de este capítulo es lograr analizar si las tensiones que se producen en el fondo son capaces o no de provocar la resuspensión de los sedimentos en el agua de la bahía y, en consecuencia, activar episodios de crecimiento de algas tóxicas para los moluscos que residen allí.

Para este análisis, se comparan las tensiones que se producen con la tensión crítica. Si las tensiones reales superan la crítica, tendrá lugar la resuspensión de sedimentos, mientras que si, por lo contrario, los datos medidos son inferior a la tensión de corte crítica, esto indicará que los sedimentos permanecen en el fondo de la bahía.

Shields (1936) desarrolló una metodología para calcular la tensión de corte mínima necesaria para iniciar el movimiento de las partículas sumergidas en un fluido. Para poder usarla, es necesario conocer el parámetro crítico de Shields, descrito por la siguiente ecuación:

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{g(\rho_s - \rho)D} \quad (19)$$

Donde:

θ_{cr} = Parámetro crítico de Shields

τ_{cr} = Tensión crítica de Shields

ρ_s = Densidad del grano = 2700Kg/m³

D= Diámetro mediano del grano (D₅₀ = 0.002mm)

g = Gravedad terrestre = 9.81m/s²

ρ = Densidad del agua

El tamaño de grano adimensional D* se define como:

$$D_* = \left[\frac{g(s-1)}{\nu^2} \right]^{1/3} \cdot D \quad (20)$$

Donde s corresponde al cociente, adimensional, entre la densidad del grano y la del agua, y ν es la viscosidad cinemática del agua, que tiene un valor de $10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$.

El parámetro de Shields se puede relacionar con el tamaño de grano adimensional D^* a través de la curva representada en la Figura 68.

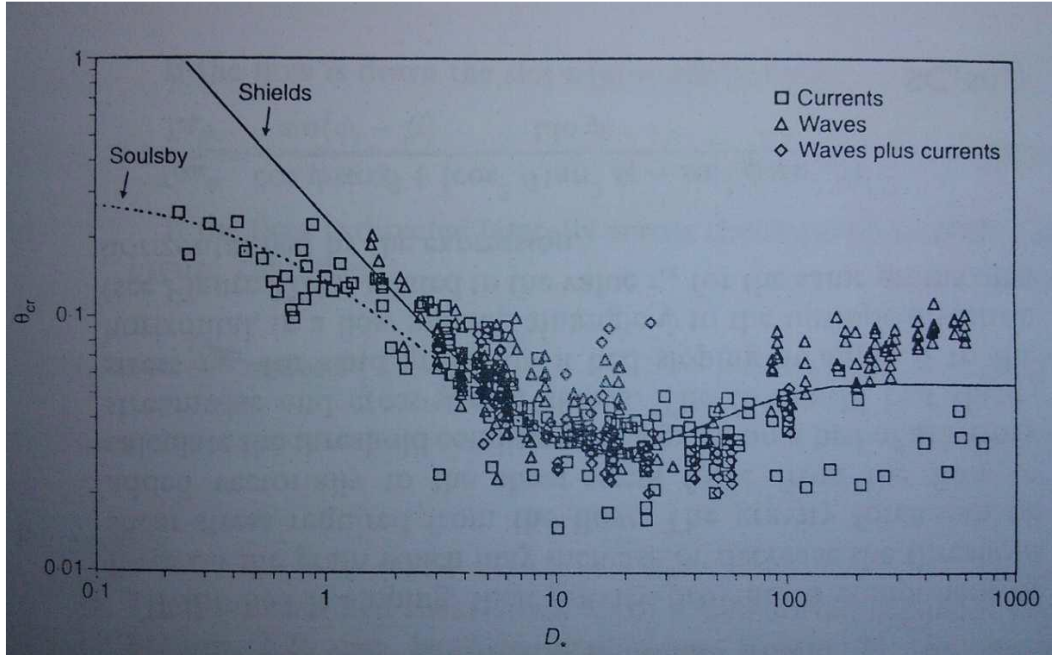


Figura 68: Umbral de movimiento de las partículas bajo los efectos de oleaje y corrientes. Fuente: *Dynamics of marine sands*. (Soulsby 1997)

Sin embargo, Soulsby y Whitehouse (1997) desarrollaron una ecuación que se asemeja a la curva propuesta por Shields:

$$\theta_{cr} = \frac{0.3}{1 + 1.2D_*} + 0.055[1 - \exp(-0.02 \cdot D_*)] \quad (21)$$

De esta manera, aplicando las ecuaciones (19), (20) y (21), se obtiene el resultado de la tensión crítica de Shields. Resulta que D^* toma un valor de 0.037m. El parámetro crítico de Shields obtenido por la ecuación de Soulsby y Whitehouse (1997) resulta ser de 0.2872. Así pues, finalmente, se llega a la tensión crítica de Shields, la cual provoca el inicio del movimiento de las partículas del fondo de la bahía cuando es superada. Este valor es de 0.009N/m^2 . Esta cifra destaca por ser muy baja, pero la causa fundamental de este hecho es el diámetro tan pequeño de los lodos que conforman el fondo de la bahía.

Una vez hechos estos cálculos se compara la tensión de corte crítica de Shields con las tensiones encontradas en el fondo de la bahía a lo largo de las dos campañas estudiadas. Con esto se observa que la tensión de corte crítica es muy inferior a la que se presenta en la realidad. En consecuencia, se debería deducir que prácticamente en la totalidad del tiempo existe resuspensión y los análisis de la turbidez deberían corroborarlo. Sin embargo, esto no es así, porque no se tienen en cuenta los efectos cohesivos del material fino.

En consecuencia, la fórmula deducida no se aplica cuando el sedimento que se estudia es tan fino como en el caso de la bahía dels Alfacs. Por este motivo se ha descartado la posibilidad de encontrar una tensión crítica generalizada para toda la bahía, sino que cada episodio seleccionado permitirá estimar su tensión crítica particularizada.

5.2. Episodios de turbidez

5.2.1. Introducción

El objetivo de los anteriores análisis es poder encontrar, en la serie de datos temporales, episodios en los que se produce un aumento repentino de la turbidez. A través de la puesta en común de toda esta información trabajada hasta el momento, el objetivo es correlacionar los distintos procesos hidrodinámicos con los eventos de incremento de turbidez medida como indicador de los procesos de resuspensión de partículas. Además, se pretende poder explicar razonadamente cuales son los motivos físicos que han dado lugar al incremento de la turbidez de la bahía.

Para poder lograr este objetivo, se ha realizado un trabajo detallista consistente en elegir episodios con una turbidez destacable. A continuación, se han elaborado gráficos de viento (dirección e intensidad), velocidad de la corriente en el fondo, dirección de corriente y tensión asociada al oleaje, a la corriente y combinada para tratar de hallar posibles correlaciones entre estas variables y las variaciones de turbidez en la columna de agua. De esta forma se han podido explicar algunos eventos o episodios de resuspensión. En total, después de descartar algunos por la complejidad del razonamiento y no ser claros, se hallan seis distintos escenarios que se detallan a continuación (por orden cronológico):

- E1: A partir del 9 de Julio de 2013 y hasta el 11 de Julio del mismo año, en el OBS instalado en el interior de la bahía.
 - E1a: El 9 de Julio de 2013.
 - E1b: El 10 y 11 de Julio de 2013.
- E2: Entre el 3 y el 5 de Agosto de 2013, en el OBS del centro de la bahía.
- E3: El 7 de Agosto de 2013, en el OBS del centro de la bahía.
- E4: Desde el 16 de Julio hasta el 12 de Agosto de 2013, en el sensor situado en la bocana.
- E5: Del 5 al 28 de Marzo de 2014, en el sensor de la bahía.
- E6: Del 28 de Marzo al 30 de Marzo de 2014, en el OBS del centro de la bahía.

Para ilustrar de una forma más clara la localización temporal de cada uno de los episodios, en la Figura 69 y en la Figura 70 se muestra la evolución de la turbidez a lo largo de todo el periodo de estudio identificándose los eventos mencionados. En ellos se indican los distintos episodios que se estudiarán a continuación.

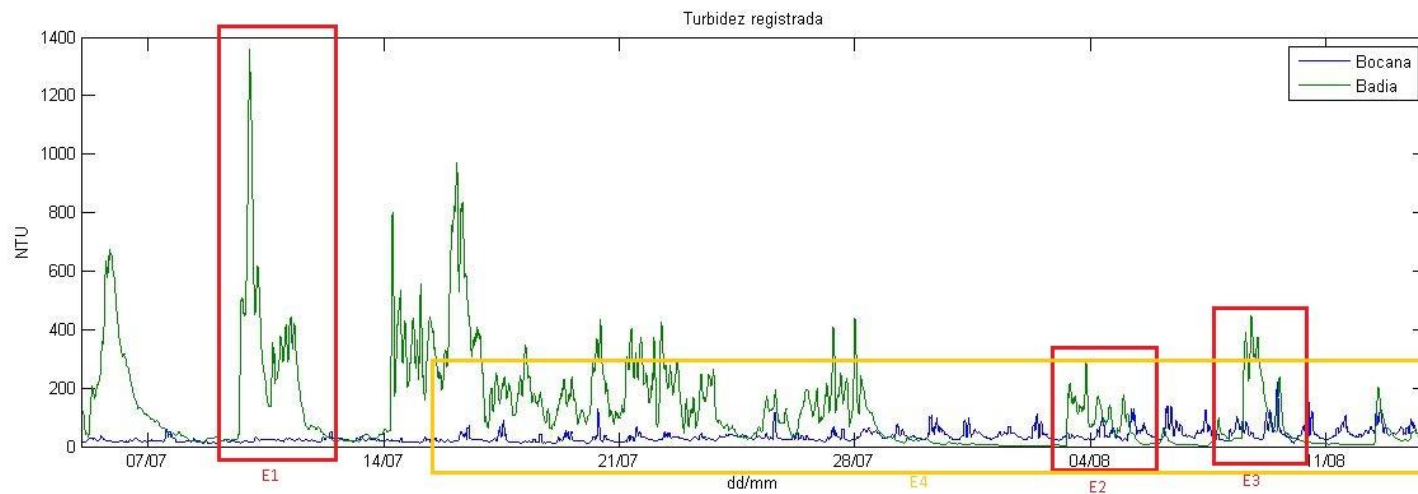


Figura 69: Localización temporal de los escenarios estudiados que tienen lugar durante la campaña de verano de 2013 en la bahía (E1, E2 y E3) y en la bocana (E4).

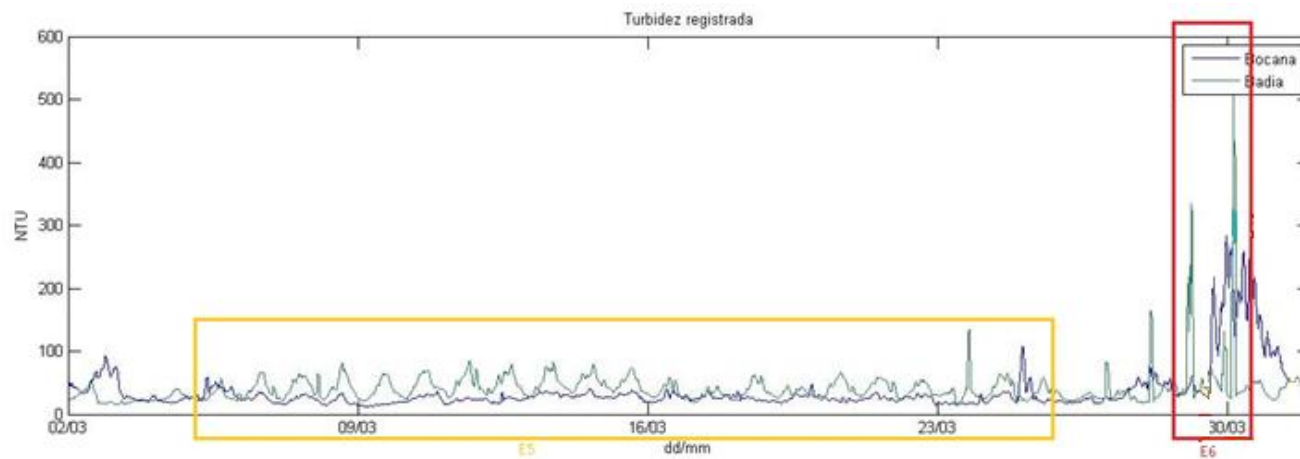


Figura 70: Localización temporal de los escenarios estudiados que tienen lugar durante la campaña de invierno de 2014 en la bahía (E5 y E6) y en la bocana (E7).

5.2.2. Caracterización de los escenarios

A continuación, se presentan los episodios anteriores. Para cada uno de ellos, el primer gráfico que siempre se muestra es el de la turbidez, expresada en unidades de NTU. A partir de él, aparecen los datos correspondientes al mismo periodo de tiempo pero distintas variables según lo que se ha considerado más significativo. Por ejemplo, puede ser necesario representar los datos de viento obtenidos en la estación meteorológica de Les Cases d'Alcanar, o los datos de corriente, como es la velocidad en el fondo y su dirección. A continuación, se muestran los gráficos de tensión debida al oleaje o a la corriente según convenga en cada caso. Para finalizar, siempre se añade el gráfico de la tensión combinada entre estas dos componentes. Finalmente se compara la tensión crítica a partir de la cual las partículas del fondo son resuspendidas, generando así la turbidez observada.

Episodio 1: Del 9 de Julio al 11 de Julio de 2013, en el centro de la bahía.

De una forma excepcional, este primer episodio (Figura 71) se descompone, a su vez, en otros dos, que se llamarán E1a y E1b para distinguirlos entre sí. El primero de ellos tiene lugar el 9 de Julio, y el segundo lo hace a continuación, el día 10. Aunque se han estudiado como componentes de un único episodio, esto no significa que estén relacionados. Es una mera cuestión práctica haberlos unido, dado que, al encontrarse tan cerca uno de otro en la línea cronológica del tiempo, los gráficos son más claros si se tratan de forma conjunta.

Así pues, el patrón que rige cada uno de estos dos episodios es completamente distinto, de la misma manera que sucede en su explicación y origen. Por una parte, el episodio nombrado E1a parece que se debe a un cambio repentino en la dirección del viento. El viento, en un principio, tiene una dirección de 0° , es decir, de componente Norte. A continuación tiene lugar, a partir de las 14:50h y hasta las 19:40h, un viento proveniente de Levante, es decir, del Este. En consecuencia, a causa de la forma de la bahía, este viento tiene un fetch relativamente considerable (de 6,5 Km), por lo cual es capaz de generar un oleaje importante, de hasta 0.45m. Finalmente, este oleaje lleva asociado una tensión sobre el fondo suficiente para resuspender el sedimento que se encuentra en el fondo de la bahía. De esta manera, la turbidez aparece coincidiendo con el pico de la tensión de oleaje, y unas tres horas después de que la dirección del viento empiece a ser de 90° .

Por otra parte, el origen del incremento de turbidez que describe el episodio E1b es completamente diferente. Esta vez, lo que da lugar al incremento de tensiones que resuspenden el fondo es una seiche. Se llega a esta conclusión a partir de la observación del gráfico que representa la velocidad en el fondo. El primer pico de esta velocidad coincide exactamente con el pico en la turbidez. Al mismo tiempo, también lo hace la tensión debida a la corriente. El hecho que hace deducir que se trata de una seiche es la oscilación que se puede observar en la figura de la velocidad del fondo y que responde a un periodo de una hora (modo natural de oscilación). Esta oscilación se inicia

aproximadamente el 10 de Julio a las 17h, y tiene una duración también aproximada de 18 horas, por lo que finaliza a las 11h del día 11 de Julio de 2013. Durante este periodo la turbidez medida es significativa.

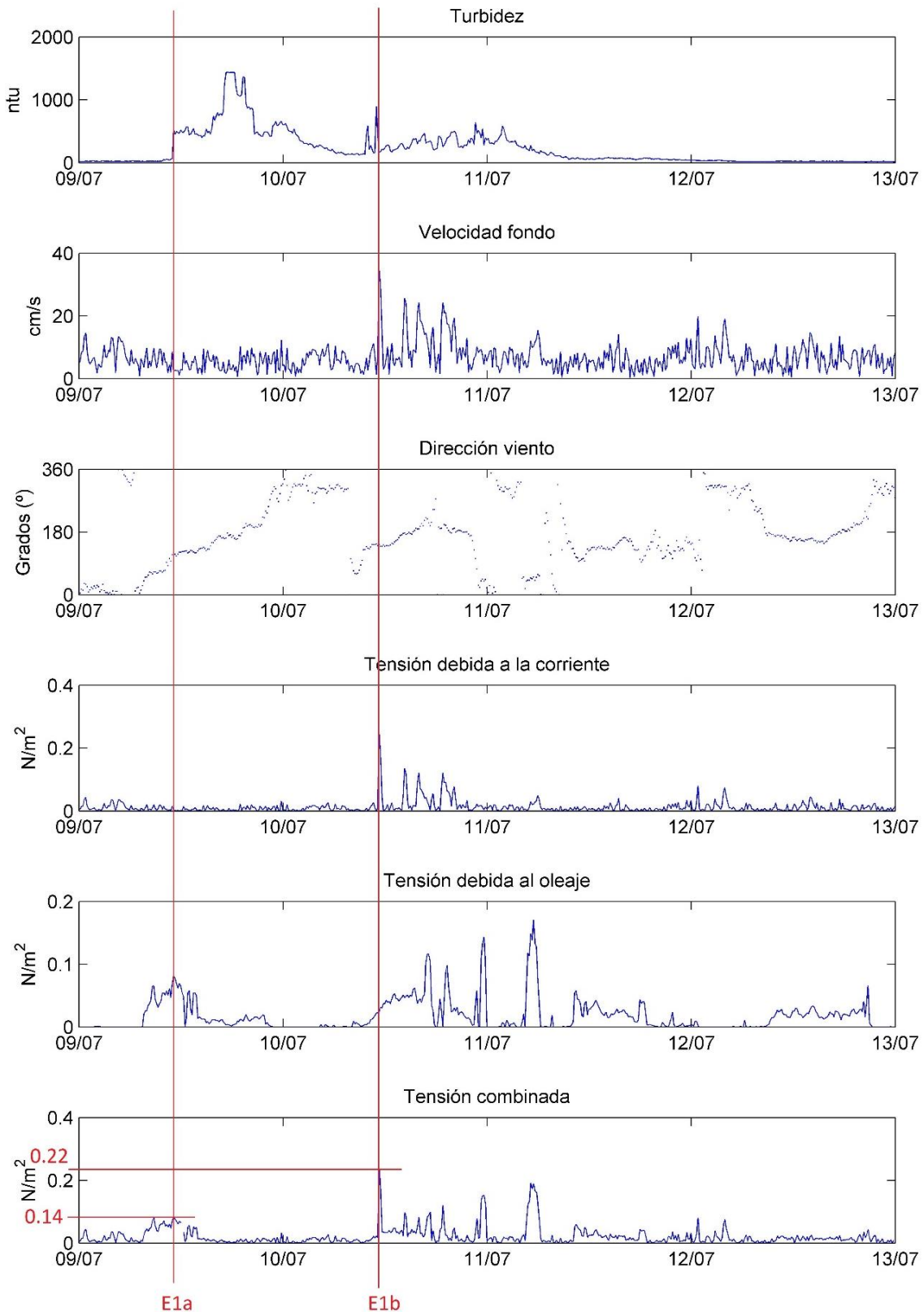


Figura 71: Series de datos más representativas para el episodio E1.

Este primer episodio E1 permite estimar cual es la tensión crítica a la que está sometido el fondo de la bahía para que permita generar la resuspensión de los sedimentos. El primero de los dos episodios que conforman el E1, es decir, el E1a, lleva a concluir que esta tensión crítica es de 0.14N/m^2 . En cuanto al episodio E1b, la tensión que se encuentra es mucho mayor, es de 0.22N/m^2 . Estas dos cifras serán utilizadas más adelante para calcular la posible tensión crítica media del fondo.

Episodio 2: Entre el 3 y el 5 de Agosto de 2013, en el centro de la bahía

Este episodio se inicia el 3 de agosto cuando tiene lugar una seiche de periodo de 1h. Estos cambios en la velocidad del fondo nos muestran como las corrientes son capaces de alcanzar una tensión suficiente como para que el sedimento que está depositado en el fondo de la bahía pueda ser resuspendido. A partir de este momento, la turbidez presenta un incremento de NTU que dan peso a esta hipótesis. Este principio del episodio se numera E2a, y se muestra en la Figura 72.

A continuación, mientras aún perdura el efecto en la turbidez de esta seiche, se producen unos cambios en el viento que hacen incrementarla. Según los datos que se obtuvieron de la estación meteorológica de Les Cases d'Alcanar, tubo lugar una intensificación del viento. El pico que se produce en intensidad de viento coincide, después de unos pocos minutos, con un pico claramente identificable en el gráfico de la turbidez (episodio identificado como E2b). Además, durante las horas previas a este pico en la intensidad del viento, la estación meteorológica registra que la dirección de la cual proviene es del este, es decir, que el mismo viento de levante que aparecía en el episodio anterior vuelve a hacerlo, permitiendo que el mayor fetch posible en la bahía genere una significativa componente en la tensión debido al oleaje.

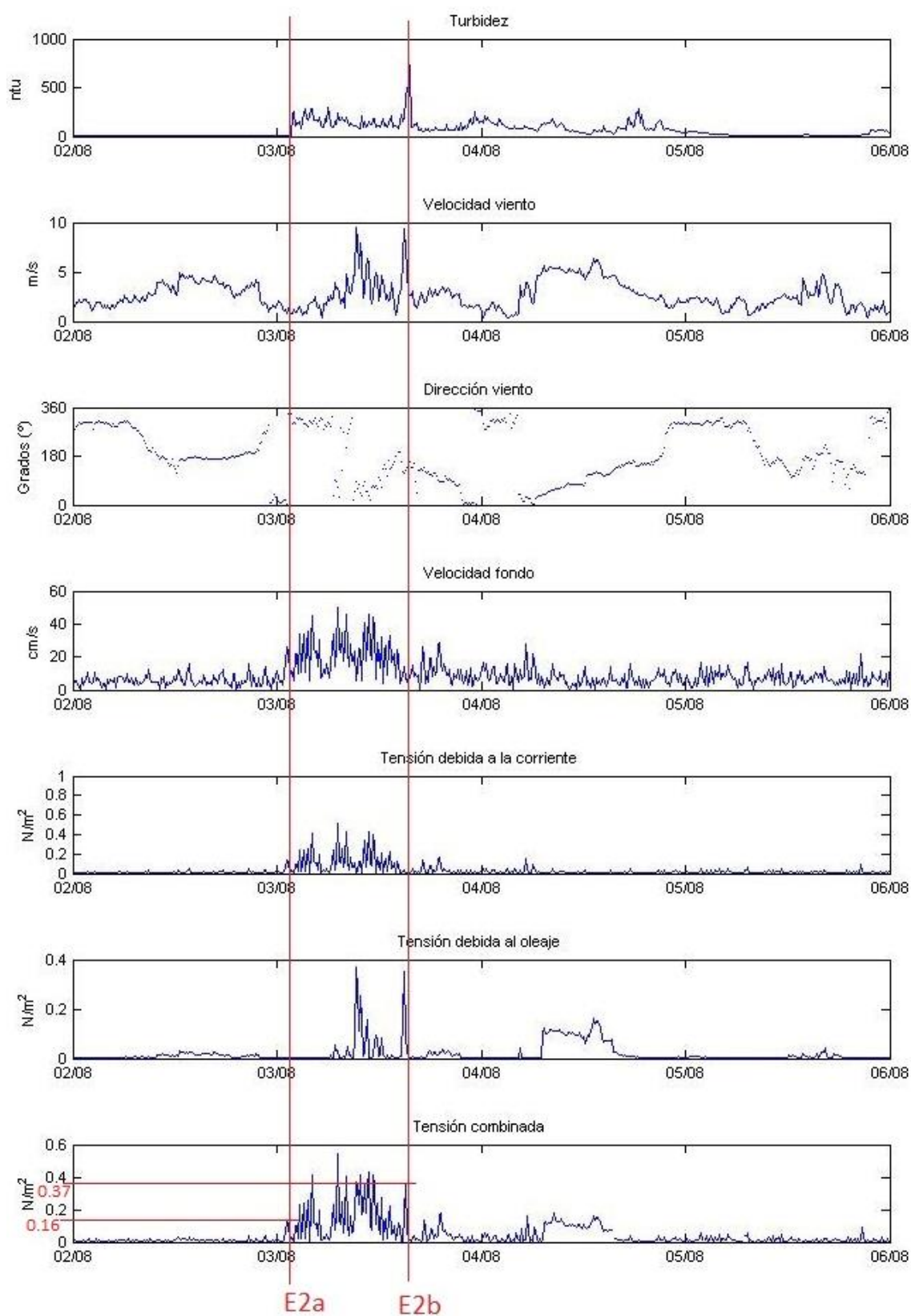


Figura 72: Series de datos más representativas para el episodio E2.

De la misma manera que sucede en el episodio E1, los episodios E2a y E2b permiten estimar una tensión crítica a partir de la cual las partículas del fondo de la bahía son

resuspendidas. Por una parte, el primer episodio E2a permite aproximar esta tensión crítica de inicio del movimiento en, aproximadamente, 0.16N/m^2 . Por otro lado, el segundo pico, el que es debido al efecto del oleaje originado por el viento, lleva a concluir que la tensión crítica necesaria es de 0.37N/m^2 .

Episodio 3: El 7 de Agosto de 2013, en el centro de la bahía

El siguiente episodio que se estudia tiene lugar el día 7 de Agosto, y es registrado por el sensor OBS que se instala en el centro de la bahía. Tal y como se observa en la primera de las figuras que siguen a continuación, la turbidez presentó un pico ese día durante la campaña de verano de 2013. Aunque no se trata de unos valores absolutos de NTU demasiado elevado, tal y como ya se ha comentado en los capítulos anteriores, lo importante es el incremento diferencial que se produce. En este caso, este dato es bastante importante, motivo por el cual se intenta explicar el fenómeno.

Durante este episodio, aparecen las brisas. Sin embargo, este tipo de viento no es suficientemente fuerte como para generar un oleaje que cree una fuerte tensión en el fondo de la bahía. Por lo tanto, no aparece turbidez en el agua correlacionada con las brisas. En cambio, cuando aparece un viento de levante, que aunque no sea de una velocidad elevada ni de una duración larga, su dirección permite generar oleaje significativo, de unos 20cm, es suficiente como para generar tensiones en el fondo que inicien el movimiento de las partículas del fondo.

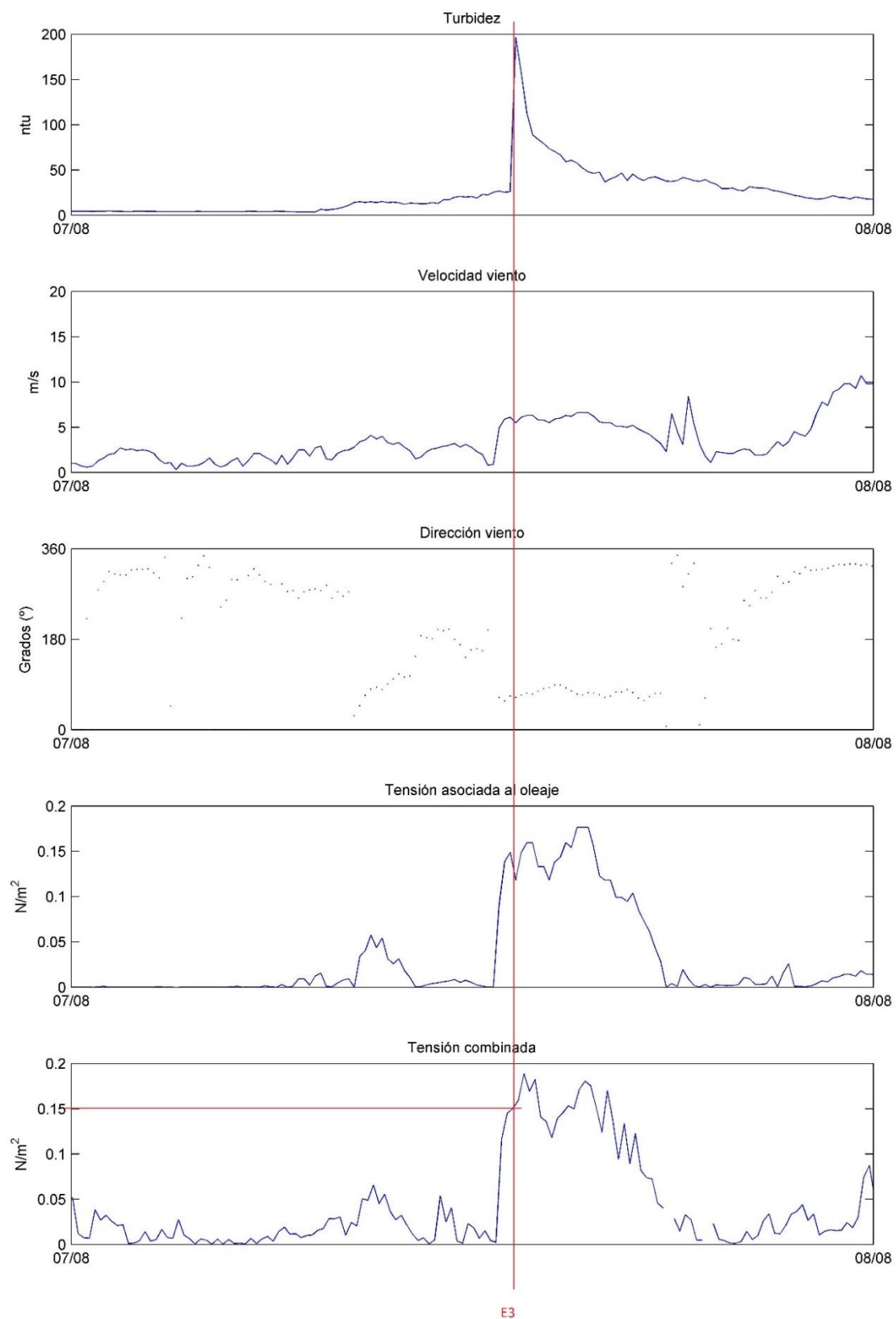


Figura 73: Series de datos más representativas para el episodio E3.

La Figura 73 muestra como la tensión en el fondo se incrementa en cuanto el viento empieza a cambiar de dirección y venir del Este. Al cabo de unos minutos, la tensión llega a ser suficiente (de 0.15N/m^2) como para conseguir que se produzca la resuspensión de sedimentos. Es entonces cuando la turbidez en el agua alcanza su pico, que a medida que pasa el tiempo va decayendo hasta que toda la materia en suspensión vuelva a encontrarse sedimentada en el fondo de la bahía.

Episodio 4: Desde el 16 de Julio hasta el 12 de Agosto de 2013, en el sensor situado en la bocana.

A continuación, se describe un episodio que se reproduce cíclicamente durante cuatro semanas. En la Figura 74 se aprecian incrementos diarios de la turbidez. A priori, a partir de su clara periodicidad diaria, se podría llegar a pensar que este hecho es debido al paso de las barcas pesqueras a través de la bocana, con sus hélices, al ser una zona de bajo calado. Pero la pesca estaba vedada durante esas fechas. Según la orden AAM/64/2013, publicada en el *Diari Oficial de la Generalitat* el día 16 de abril de 2013 por el *Departament d'Agricultura, ramaderia, pesca, alimentació i medi natural*, el área marítima cercana a la bahía dels Afacs (identificada como zona 2 en la orden) tiene vedada la pesca de arrastre desde el 1 de Julio y hasta el 1 de Setiembre. El objetivo de esta prohibición es proteger la etapa reproductiva de los principales peces de la zona en cuestión.

Sin embargo, no hay ningún elemento significativo que explique el origen de estos incrementos periódicos en la turbidez. Ningún registro de la estación meteorológica de Les Cases d'Alcanar ni ningún otro dato obtenido de las dos estaciones situadas en la bahía y la bocana parecen explicar este episodio. En este sentido, se descarta la brisa marina puesto que el olaje generado por este fenómeno está muy por debajo del que produciría una tensión por encima de la tensión crítica observada.

Es necesario, entonces, pensar en las fechas en las que el episodio 4 tiene lugar: durante la segunda quincena de Julio y durante el mes de Agosto. Además, durante este segundo mes, los picos diarios son más importantes. Esto nos lleva a pensar que se trata de las épocas más turísticas de la zona, donde se incrementa significativamente el paso de embarcaciones en la bocana, ya sea por el turismo o por las embarcaciones que se dirigen a la fábrica de cemento que se encuentra entre las poblaciones de Montsià Mar y Les Cases d'Alcanar por unas obras que se estaban realizando en los lechos. En consecuencia, el patrón cíclico (frecuencia diaria) de las medidas de turbidez respondería al paso de embarcaciones durante el periodo diurno. Otros factores de tipo biológico pueden ser también origen del incremento de la turbidez.

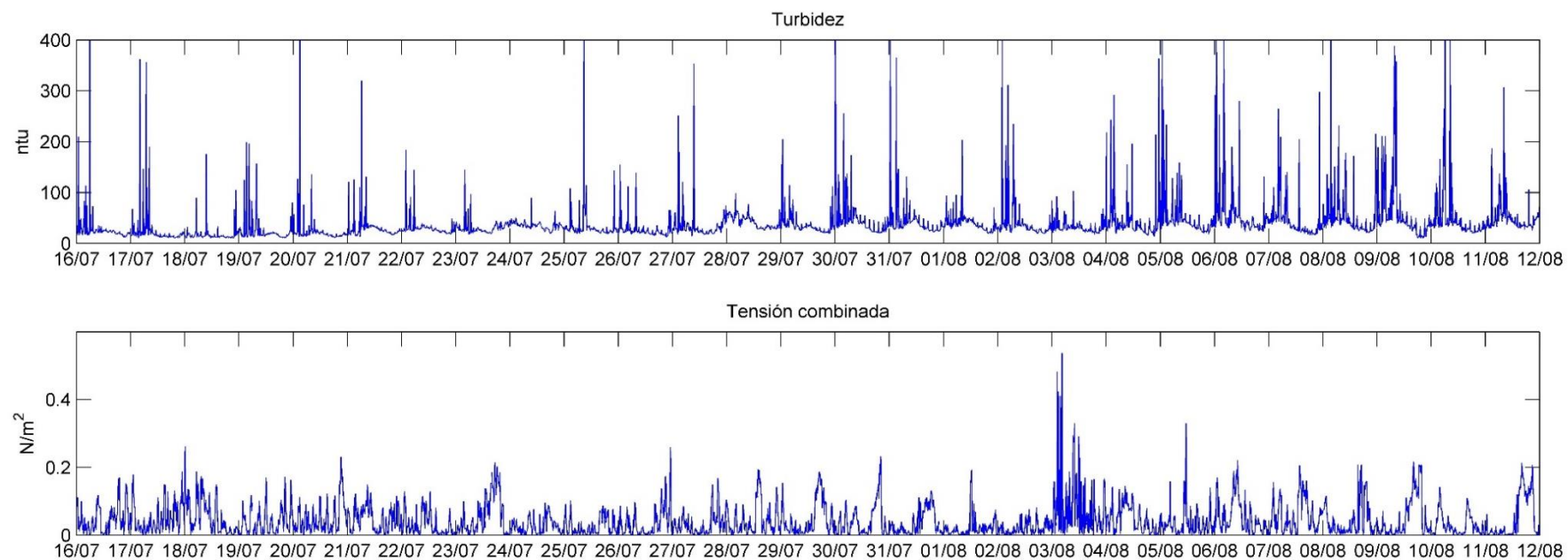


Figura 74: Series de datos más representativas para el episodio E4.

Episodio 5: Del 5 al 28 de Marzo de 2014, en el interior de la bahía.

De la misma manera que ocurre en el episodio anterior, en el que durante el verano se observó, en la bocana, un ciclo en la turbidez debida al paso de embarcaciones, algo parecido tiene lugar durante el invierno.

Si se observa la Figura 75 , se identifica el incremento diario de la turbidez, esta vez en invierno y en el interior de la bahía. La época en la que este hecho se produce, indica que, aunque las consecuencias son las mismas, la causa que origina es algo distinta. Se contempla la hipótesis de que los factores biológicos sean los responsables del incremento de turbidez. El fitoplancton, que es la base de la cadena alimentaria del ecosistema acuático ya que sirve de alimento a organismos mayores, tiene una dinámica muy característica, pues necesita de la fotosíntesis para desarrollarse y por lo tanto su presencia en la superficie del agua de la bahía es más intensa en las horas del día con más luz solar pudiendo hacer algunas especies resguardarse en aguas más profundas cercanas al fondo.

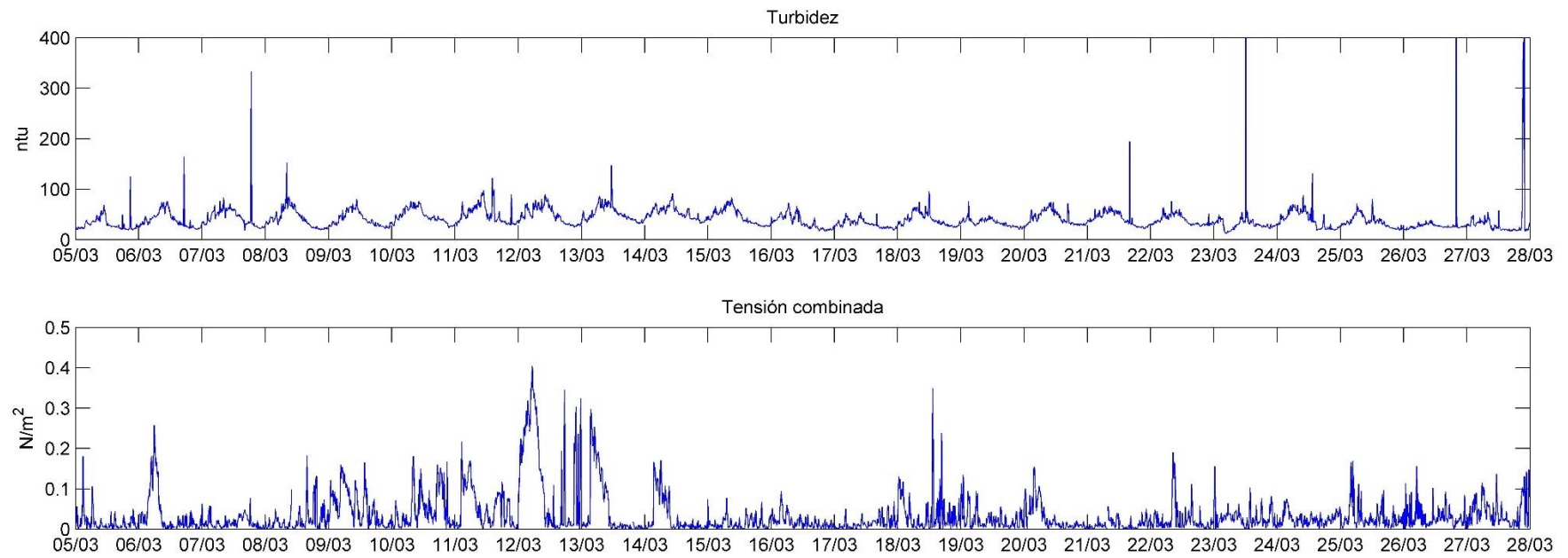


Figura 75: Series de datos más representativas para el episodio E5.

Además, si se realiza un análisis más detallado de los episodios E4 y E5 sobre a qué horas es mayor la turbidez cada día en promedio (ver Figura 76), se llega a la conclusión de que el pico de turbidez se produce, para cada uno de los dos episodios, siempre a la misma hora, que cambia entre un episodio y el otro, que es entorno al mediodía.

Por una parte, el episodio que tiene lugar en verano, y que, por lo tanto, se ha relacionado con el turismo, tiene un pico muy llano, es decir, que se distribuye de forma parecida a lo largo de varias horas. De hecho, entre las 9 de la mañana y las 5 de la tarde es cuando suele encontrarse una mayor turbidez en el agua. Evidentemente, este horario coincide con el de las obras cuyos barcos circulaban hacia la cementera, y por lo tanto, durante la noche no hay casi circulación de embarcaciones.

En cambio, si se observa la línea que muestra cómo evoluciona la turbidez a lo largo de día durante el invierno, el patrón es totalmente distinto. Existe un pico mucho más pronunciado entre las tres y las cinco de la tarde. Este dato parece tener relación con el movimiento del zooplancton. Durante el anochecer, la luz solar disminuye haciendo que el zooplancton ascienda hacia la superficie, motivo por el cual la turbidez disminuye (los sensores se encuentran en el fondo de la bahía). De esta forma, se alcanza el pico de la turbidez durante las horas de más luz solar hasta el atardecer.



Figura 76: Evolución de la turbidez según la hora del día, durante la campaña de verano y la de invierno.

Episodio 6: Del 28 de Marzo al 30 de Marzo de 2014, en el centro de la bahía.

Durante el anochecer del día 28 de marzo de 2014 la estación meteorológica situada en Les Cases d'Alcanar detecta un viento de levante, bastante intenso, que a continuación resulta ser bastante duradero. Tras unas horas desde su inicio, se llegan a alcanzar tensiones en el fondo asociadas al oleaje de $0.4N/m^2$ aproximadamente. Es a partir de entonces cuando la turbidez muestra un pico muy pronunciado. El motivo de este hecho es que el viento, al cabo de algo de tiempo de actuar sobre el agua de la bahía desde el

norte, es capaz de ejercer una fuerza importante y constante sobre un fetch suficientemente largo como para que se alcance un oleaje que, a su vez, genera tensiones en el fondo de la bahía. Estas tensiones, en cuanto son de una magnitud suficiente como para propiciar el inicio del movimiento sobre las partículas que se encuentran situadas en el fondo, provocan que el agua se enturbie de repente.

Sin embargo, a diferencia de los escenarios que se han comentado anteriormente, el patrón que se observa en la Figura 77 en cuanto a la evolución de la turbidez es muy distinto. En los casos anteriores, el pico de turbidez se encontraba poco después de ver como ésta empezaba a incrementarse. A continuación, decaía de una manera más lenta, de forma que el efecto perduraba durante más tiempo. En cambio, lo que se observa en este episodio es completamente distinto.

Durante el episodio E6, aparecen dos picos claramente distinguidos de turbidez. Éstos tienen lugar al inicio del episodio y al final del mismo. Por el contrario, durante el intervalo de tiempo que queda entre los dos, la turbidez desaparece casi por completo, llegando a adquirir, de forma casi inmediata, los valores mínimos de turbidez, que siempre se encuentra en cualquier momento.

Para encontrar una explicación a esta evidente diferencia, se piensa en la advección de las partículas. Puede darse el caso en que la resuspensión de sedimentos se localice en otro punto de la bahía y, por lo tanto, el sensor situado en el centro no detecte un incremento de turbidez. Sin embargo, una corriente puede desplazar el sedimento resuspendido, de forma que el OBS detecta, casi de forma repentina, un pico de turbidez y, a continuación, otro decaimiento. Este proceso parece ocurrir en el segundo pico de este episodio. Además, la Figura 52 da fuerza a esta hipótesis dado que en ella se observa un flujo superior a la media durante esas fechas.

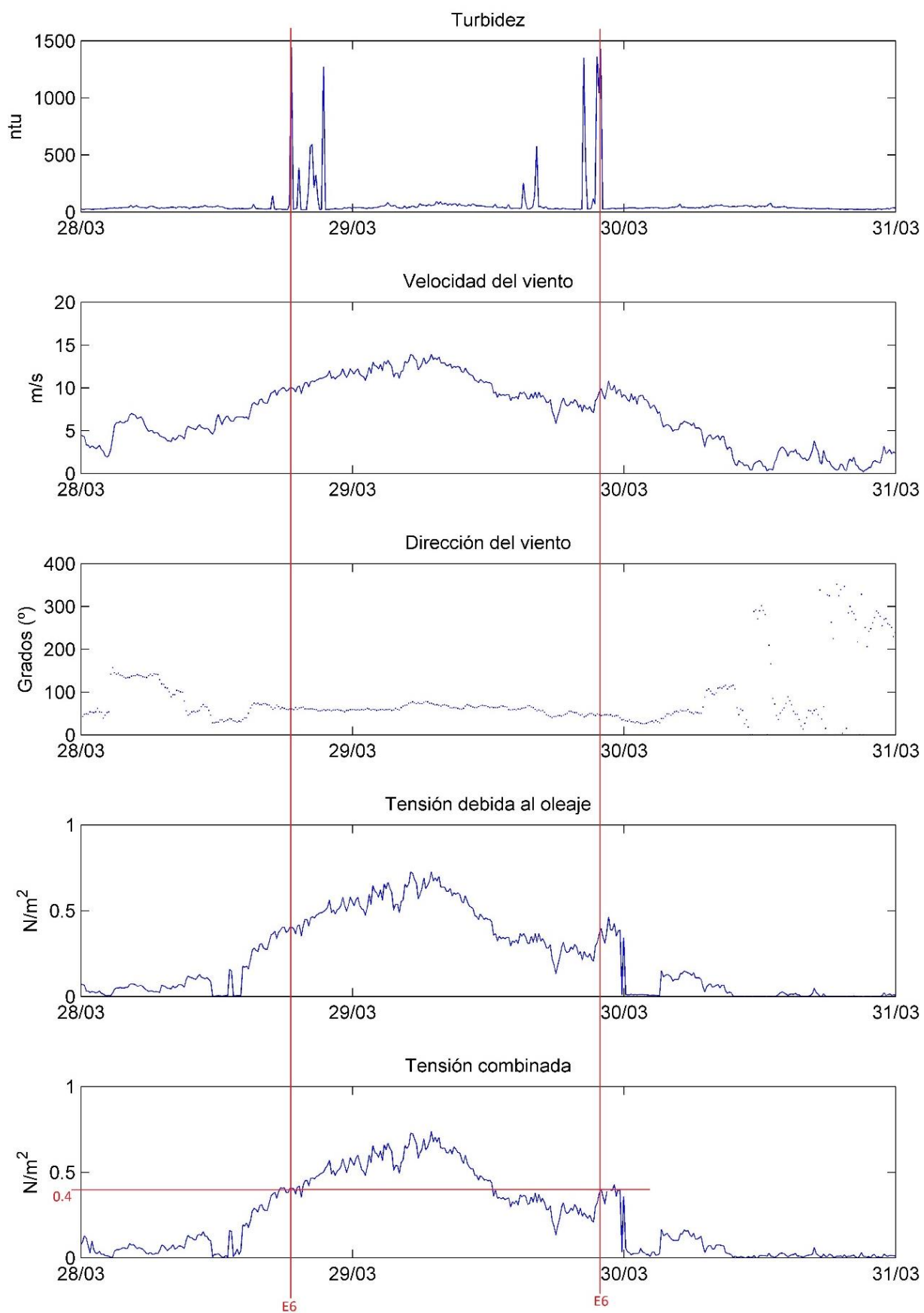


Figura 77: Series de datos más representativas para el episodio E6.

5.2.3. Discusión de resultados

La resuspensión de sedimentos en la bahía dels Alfacs es el fenómeno estudiado en esta tesina. El objetivo de este capítulo del trabajo es recapitular las causas principales de este fenómeno. Se intenta identificar distintos episodios en las series temporales analizadas con datos experimentales tomados en dos puntos localizados en la misma bahía dels Alfacs y en la estación meteorológica de Les Cases d'Alcanar.

Para resumir las distintas hipótesis que se han realizado para tratar de explicar algunos de los instantes en los que los sensores instalados gracias al proyecto MESTRAL muestran un incremento sustancial de la turbidez, se construye una tabla con las características más importantes de cada uno de estos episodios.

Tabla 8: Tabla resumen de los episodios considerados y sus características principales.

Nombre	Fecha	Localización	Mecanismo más probable	Tensión crítica estimada de inicio de movimiento (N/m ²)
E1a	09/07	Bahía	Oleaje generado por viento de levante	0.14
E1b	10/07 y 11/07	Bahía	Seiche	0.22
E2a	03/08	Bahía	Seiche	0.16
E2b	04/08	Bahía	Oleaje generado por viento de levante	0.37
E3	07/08	Bahía	Oleaje generado por viento de levante	0.15
E4	16/07 a 12/08	Bocana	Otros	-
E5	05/03 a 28/03	Bahía	Otros	-
E6	28/03 a 30/03	Bahía	Oleaje generado por viento de levante	0.40

A priori, se identifican tres hipótesis, que resultan ser las causas más comunes de la resuspensión de los sedimentos depositados en el fondo de la bahía:

- Viento de levante que genera oleaje
- Seiche
- Otros (paso de embarcaciones, actividad biológica)

Todas ellas han servido para explicar más de un episodio. Esto hace que se conviertan en hipótesis más plausibles que si tan solo se hubiera podido encontrar un ejemplo de cada. Es complicado, como ya se ha venido explicando a lo largo de la presentación del trabajo, asegurar que las distintas posibilidades que se contemplan sean verídicas al 100%. Esto se debe, principalmente, a la dificultad del análisis de los datos que se obtienen de los dos sensores OBS que se han instalado. Pequeños detalles, como el hecho de conseguir explicar dos episodios diferentes por el mismo factor, logran dar más fuerza a los razonamientos.

A continuación se trata de explicar cómo afectan cada una de estas hipótesis a la turbidez del agua o, lo que es lo mismo, la resuspensión de sedimentos que se encuentran en el fondo de la bahía. Para empezar, se presenta el efecto del viento de levante. Es un viento que proviene del este, por lo que, debido a la geometría y orientación de la bahía, es capaz de generar el mayor oleaje interno en la bahía. Este fetch, de más de 5km (o hasta 10Km) para la estación de la bocana y de 6,5km para la que se encuentra en el centro de la bahía, es recorrido por el viento. En consecuencia el viento, aunque no sea de una intensidad demasiado importante, es capaz de generar un oleaje que provoca unas tensiones superiores a la crítica en el fondo de la bahía. Así, la materia que está allí depositada se resuspende enturbiando el agua.

El segundo factor que se ha hallado como origen de la resuspensión de los sedimentos es la aparición de seiches. Cuando se genera una onda estacionaria, de gran amplitud en la bahía, en este caso de periodo de una hora, se alcanzan velocidades en el fondo de gran magnitud. (Cerralbo et al., 2015) En consecuencia, la tensión debida a estas corrientes es mayor que la crítica y, por lo tanto, el sedimento es resuspendido aumentando la turbidez de la zona en cuestión.

Finalmente, el último factor que se ha estudiado es el desplazamiento de embarcaciones que pasan a través de la bocana para acceder o salir del puerto. Sea cual sea el tipo de embarcación que navega, su paso origina tensiones en el fondo que, de la misma manera que en los casos anteriores, es capaz de resuspender los sedimentos que se encuentran en el fondo. Sin embargo, este caso, que se deduce gracias al ciclo diario que se observa en la turbidez, no llega a generar una turbidez tan elevada como los anteriores.

Es interesante, al mismo tiempo, conocer aquellos factores que no parecen ser capaces de generar la resuspensión de sedimentos: las brisas de verano, el viento de mestral y las seiches con frecuencia de tres horas.

6. Conclusiones

La resuspensión de sedimentos en la bahía dels Alfacs está dominada principalmente por la acción de dos factores principales: el oleaje inducido por el viento de levante y la corriente originada por las seiches de frecuencia de una hora. También existen otros factores que pueden generar la resuspensión de las partículas: la tensión causada por circulación de embarcaciones y factores de carácter biológico.

El hecho de que durante las campañas de toma de datos se hayan podido registrar cuatro episodios con la misma causa de la resuspensión de las partículas, da fuerza a la primera de las hipótesis. Se han podido calcular oleajes relativamente enérgicos, que ejercían elevadas tensiones de corte sobre el fondo, pudiendo provocar la resuspensión de sedimentos. Este oleaje viene provocado por los vientos de Levante (Este), muy habituales a lo largo del litoral catalán, ya que su dirección permite que el viento recorra el mayor fetch de la bahía a pesar de que no sean los vientos más intensos, sin llegar a los 10m/s.

La segunda hipótesis que se ha formulado tras la observación de otros dos episodios de alta turbidez seleccionados, consiste en el fenómeno de las seiches con frecuencia de una hora. Este mecanismo que define la hidrodinámica de la bahía y que es debido a su geometría y poca profundidad, genera corrientes cuya dirección es de entrada y salida por la bocana de la bahía. La consecuencia de estas corrientes es que son capaces de traducirse en una tensión en el fondo suficiente para que se pueda dar la resuspensión de sedimentos.

A parte de estas dos hipótesis principales en cuanto a la causa de la resuspensión de sedimentos, medida gracias al indicador de la turbidez detectada por los sensores OBS, existen otras dos hipótesis distintas: la circulación de embarcaciones y los factores de carácter biológico.

La primera de ellas, formalizada para caracterizar uno de los escenarios, tiene su origen en la circulación continua de embarcaciones. Se ha podido averiguar que las horas de mayor turbidez durante el verano son entre las nueve de la mañana y las cinco de la tarde, horario que coincide con el paso de las embarcaciones.

En cuanto a la última de las hipótesis desarrolladas, los que hacen referencia a los factores biológicos, ésta ha sido empleada para encontrar un razonamiento en la evolución de la turbidez de dos de los episodios seleccionados. Su explicación reside en el comportamiento y desarrollo del fitoplancton. Este necesita de la fotosíntesis para su crecimiento, es decir, de la luz solar. La evolución de la turbidez del día sigue el mismo patrón que la incidencia de la luz solar: cuando amanece, la turbidez va en aumento para tener su pico al mediodía, justo antes de que empieza el decaimiento de la población.

La distinción entre estas dos últimas hipótesis contempladas requiere un trabajo complementario. Los sensores OBS no son capaces de diferenciar qué tipo de elemento

interfiere en la trayectoria del sensor óptico. De esta forma, se puede confundir el sedimento en suspensión con algún animal u objeto o con el fitoplancton. La combinación de esta dificultad con el hecho de que coincidan las horas de más luz del día (cuando prolifera el fitoplancton gracias a la fotosíntesis) con aquellas en que se llevan a cabo las actividades humanas (como la salida de embarcaciones), hace más complicado distinguir en cuál de las dos hipótesis es más cierta en estos últimos episodios.

No obstante, también ha sido relevante el presente estudio para poder identificar algunos factores que tienen lugar en la bahía dels Alfacs pero que no tienen la capacidad de provocar la resuspensión de las partículas del fondo.

En cuanto al viento, tan solo se ha detectado el viento de levante como a fuente de un oleaje suficiente para generar tensiones que inicien el movimiento de la tensión en el fondo y, por lo tanto, originen la resuspensión de sedimentos. Es interesante, entonces, reflexionar sobre otros vientos que no tienen esta capacidad.

Por un lado se encuentran los temporales de mestral, viento procedente del noroeste. Típicamente son los vientos más intensos que se dan en la costa catalana y, por lo tanto, en la bahía dels Alfacs (aproximadamente 15m/s) Sin embargo, a pesar de esta elevada intensidad, el fetch que recorre en la bahía es bastante pequeño, muy inferior al que recorre el viento de levante. Es por este motivo que el oleaje que genera el viento de mestral, no es capaz de resuspender sedimentos. El mismo razonamiento es aplicable para las brisas periódicas, de frecuencia diaria, cuyas direcciones e intensidades tampoco permiten que se genere la resuspensión de sedimentos.

Por otro lado, otro mecanismo que se da en la bahía dels Alfacs pero que no se ha observado que genere la resuspensión de sedimentos, es la seiche de frecuencia de tres horas en la bocana. El motivo de este hecho es que este tipo de seiche es menos intensa que la de frecuencia de una hora. En consecuencia, las tensiones que se dan en el fondo de la bahía por las corrientes no son suficientes para que se produzca la resuspensión de sedimentos.

Finalmente, también se ha hecho una leve mención al flujo de sedimento en el transcurso del estudio. Existen algunos casos, que no deberían dejarse de lado, en los que la resuspensión de sedimentos no es de carácter global, si no que se da en un punto concreto de la bahía y, a continuación, se transforma en un flujo de sedimentos que se desplaza. En consecuencia, pueden detectarse incrementos de turbidez de forma muy local por este mecanismo sin que sea un factor importante en términos del total de la bahía. En estos casos las medidas de turbidez no son un indicador adecuado de resuspensión de sedimentos, ya que se ha dado por advección.

Como futuras líneas de investigación, varios puntos serían interesantes de plantear. Por una parte, sería de un gran interés económico y ambiental lograr determinar específicamente todos los mecanismos ambientales que, además de generar la resuspensión de sedimentos, provocan la proliferación masiva de microalgas con

elevadas concentraciones de toxinas, es decir, las mareas rojas que contaminan los moluscos filtradores. A continuación, sería interesante poder instalar permanente algún sensor en un lugar estratégico de la bahía e implementar modelos numéricos calibrados con estos datos. Su función sería la de prevenir la llegada de estos episodios (por ejemplo aprovechar una estación meteorológica cercana para prever los episodios de *llevantades*) De esta forma, sería posible prevenir estos episodios y poder evitarlos en la medida de lo posible o minimizar sus efectos.

7. Referencias bibliográficas

7.1. Bibliografía

Batalla, R.J., Gómez, C.M. y Kondolf, G.M., 2004. Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain). *J. Hydrol.* 290, 117-136. Doi:10.1016/j.hydrol.2003.12.002

Bunt, J., Larcombe, P., Jago, C., 1999. Quantifying the response of optical backscatter devices and transmissometers to variations in suspended particulate matter. *Continental Shelf Research* 19, 1119-1220

Camp, J. 1994. Aproximaciones a la dinámica estuárica de una bahía micromareal Mediterránea. Tesis. Universitat de Barcelona.

Canicio, A., Ibáñez, C. 1996. Evaluation of water fluxes and sediment supply, in: *Impact of Climatic Change on Northwester Mediterranean Deltas*.

Cardona, L., 1993. Acuicultura extensiva en el Delta del Ebro. Departament de Biologia Animal. Universitat de Barcelona

Cembella, A., Ibarra, D., Diogene, J. y Dahl, E., 2005. Harmful algal blooms and their assessment in fjords and coastal embayments. *Oceanography*, vol. 2, nº 1, pp. 158-171. Doi: 10.5670/oceanog.1996.25

Cerralbo, P., Grifoll, M. y Espino, M., 2015. Hydrodynamic response in a microtidal and shallow bay under energetic wind and seiche episodes. *J. Mar. Syst.* 149, 1-13. doi: 10.1016/j.jmarsys.2015.04.003

Cerralbo, P., 2015. Hydrodynamic response of a shallow and microtidal estuary: Alfacs Bay. From high to low frequency processes. Tesis. Universitat Politècnica de Catalunya.

Delgado, J.A., 2013. Estudio experimental del oleaje y de la resuspensión de sedimentos en el litoral de Barcelona. Tesina. Universitat Politècnica de Catalunya.

Departament d'Agricultura, ramaderia, pesca, alimentació i medi natural, 2013. ORDRE AAM/64/2013, de 16 d'abril, per la qual s'estableixen determinats períodes de veda per a la modalitat de pesca d'arrossegament al litoral de Tarragona durant l'any 2013.

De Pedro, X., 2007. Situacions d'anòxia en zones estuàriques sense forçament mareal: una aproximació als balanços producció/consum oxigen. Tesis. Universitat de Barcelona.

Douwing, J. y Sternberg, R. 1981. New instrument for the investigation of sediment suspension processes in the shallow marine environment. *Marine geology*, Vol. 42. Pp 19-34.

- Downing, J., 2006. Twenty-five years with OBS sensors: The good, the bad and the ugly. *Continental Shelf Research* 26 2299-2318.
- Fernandez, V., Camp, J. y Comín, F., 1997. Los medios acuáticos del Delta del Ebro y su capacidad de producción. *Revista de obras públicas*, nº 3368, pp 67-71.
- Generalitat de Catalunya, Departamento de Medioambiente y Viviendas, 2008. Estudios de base para una estrategia de prevención y adaptación al cambio climático en Cataluña.
- Generalitat de Catalunya, 2009. Parc Natural del Delta de l'Ebre. Parcs de Catalunya.
- Grifoll, M., Gracia, V., Aretxabaleta, A., Guillén, J., Espino, M., y Warner J., 2014. Formation of fine sediment deposit from a flash flood river in the Mediterranean Sea. 119, 5837-5853. doi:10.1002/2014JC010187
- Guillén, J., Palanques, A., Puig, P., Durrieu de Madron, X. y Nyffeler, F., 2000. Field calibration of optical sensors for measuring suspended sediment concentration in the western mediterranean. *Sci. Mar.*, 64 (4):427-435
- Ibáñez, C., Prat, N. y Canicio, A. 1996. Changes in the hidrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro river and its estuary. *Regulated Rivers* 12(1):51-62
- Just, R., 2012. Estudio experimental de las plumas producidas por descargas costeras en el litoral de Barcelona. Tesina. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Llebot, C., Ruefa, F.J., Solé, J., Artigas, M.L., Estrada, M., 2013. Hydrodynamic states in a wind-driven microtidal estuary (Alfacs Bay). *Journal of Sea Research Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.seares.2013.05.010
- Martin, D., Pinedo, S., Sardá, R., 2000. Distribution patterns and trophic structure of soft-bottom polychaete assemblages in a north-western Mediterranean shallow-water bay. *Ophelia* 53 (1):1-17
- Ministerio de Medio Ambiente, Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad, 2016. Programa Caminos Naturales.
- Palacin, C., Gili J.M., Martín, D., 1991. Evidence for coincidence of meiofauna spatial heterogeneity with eutrophication processes in a shallow-water Mediterranean bay. *Estuarine, coastal and shelf science* (35), 1-16
- Palacin, C., Martin, D., Gili, J.M., 1991. Features of spatial distribution on benthic fauna in a Mediterranean shallow-water bay. *Mar. Biol.* 110,315-321. Doi: 10.1007/BF01313718
- Pallarès, E., 2010. Análisis numérico y experimental de las "seixas" de las bahías del Delta del Ebro. Tesina. Universitat Politècnica de Catalunya
- Pedersen, T. y Lohrmann, A., 2004. Possibilities and limitations of acoustic surface tracking. *OCEANS'04. MTS/IEEE TECHNO-OCEAN '04*, Vol 3, pp.1428-1434.

Rabinovich, A.B. y Montserrat, S., 1998. Generation of meteorological tsunamis (large amplitude seiches) near the Balearic. Natural hazards 13, 55-90

Sánchez-Arcilla, A., González-Marco, D., Bolaños, R., 2008. System Sciences. A review of wave climate and prediction along the Spanish Mediterranean coast. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 8, 1217-1228.

Sainz-Elize, S., Latorre, J.M., Escosa, R., Masià, M., Fuentes, M.V., Mas-Coma, S., Bagues, M.D., 2010. Malaria resurgence risk in southern Europe: climate assessment in an historically endemic area of rice fields at the Mediterranean shore of Spain. Malar. J. 9, 221. Doi:10.1186/1475-2875-9-221.

Slootweg, R., Rajvanshi, A., Mathur, V.B y Frontmatter, A.K., 2009. Biodiversity in Environmental Assessment: Enhancing Ecosystem Services for Human Well-Being. Cambridge University Press 978-0-521-88841-7

Tamburri, M., y Johengen, T. 2006. Performance verification statement for the Aquatec Aqualogger 210TY turbidity probe. Alliance for coastal technologies, VS01-07. Pp 41.

Van Rijn, L., Grasmeijer, B. y Ruessink B., 2000. Measurement errors of instruments for velocity, wave height, sand concentration and bed levels in field conditions. WL Delft Hydraulics. Pp 18-21

7.2. Webliografía

www.maps-for-free.com [última consulta: Abril 2016]

www.maps.google.es [última consulta: Abril 2016]

www.ign.es [última consulta: Julio 2015]

www.meteocat.cat [última consulta: Abril 2016]

www.mathworks.com [última consulta: Abril 2016]

www.nortek-es.com [última consulta: Abril 2016]

www.d-a-instruments.com [última consulta: Abril 2016]

www.gillinstruments.com [última consulta: Abril 2016]

www.turismelarapita.com [última consulta: Mayo 2016]